

INVENTARIO ARBÓREO EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO A PARTIR DE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

DANIELA BEJARANO ALZATE Y DANIELA GARCÍA VALENCIA



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2018

INVENTARIO ARBÓREO EN ECOSISTEMAS DE PÁRAMO A PARTIR DE TÉCNICAS DE
PERCEPCIÓN REMOTA

DANIELA BEJARANO ALZATE Y DANIELA GARCÍA VALENCIA

TRABAJO DE GRADO

DIRECTORES:

FRANCISCO LUIS HERNÁNDEZ TORRES, Msc

RAMÓN SERNA ISAZA, PhD

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI

TABLA DE CONTENIDO:

1.	RESUMEN	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
3.	OBJETIVOS.....	3
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
5.	JUSTIFICACIÓN	5
6.	MARCO CONCEPTUAL	6
7.	MARCO TEÓRICO	11
7.1.	CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA.....	11
7.2.	ALGORITMO FLAASH.....	12
7.3.	CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES SENTINEL-2 CON LA HERRAMIENTA SEN2COR12	
7.4.	REDUCCIÓN DE DIMENSIONALIDAD	14
7.5.	REMUESTREO DE LAS IMÁGENES	15
7.6.	TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA.....	15
7.7.	ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO	16
7.8.	RED DE DRENAJE	16
7.9.	MAPA DE PENDIENTES.....	17
7.10.	CURVAS DE NIVEL.....	18
7.11.	CLASIFICACIÓN MAPEO DEL ANGULO ESPECTRAL.....	18
7.12.	ÍNDICES DE EXACTITUD DE LA CLASIFICACIÓN	19
8.	MARCO REFERENCIAL	19
9.	DESCRIPCIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	21
10.	METODOLOGÍA	23
10.1.	ADQUISICIÓN DE DATOS “IN SITU” O INVENTARIO EN CAMPO	23
10.1.1.	PROCESO DE RECOLECCIÓN	23
10.1.2.	DESCRIPCIÓN Y TOMA DE DATOS DE CAMPO	24
10.1.3.	RECOLECCIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS DE LAS ESPECIES DE COMUNIDADES ARBÓREAS.....	25
10.1.4.	SECADO DE LAS MUESTRAS DE HERBARIO	26
10.1.5.	DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIES DE LA COMUNIDADES ARBÓREAS MUESTREADAS	26
10.2.	CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES HIPERESPECTRALES:	26

10.2.1.	ADQUISICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES.....	26
10.2.2.	PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES	27
10.2.2.1.	FILTRADO DE BANDAS SIN INFORMACIÓN DE LAS IMÁGENES HIPERESPECTRALES	27
10.2.2.2.	CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA.....	27
10.2.2.3.	CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.....	28
10.2.2.4.	REDUCCIÓN DE DIMENSIONALIDAD	29
10.2.3.	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA, MAPEO DE ÁNGULO ESPECRAL.....	29
10.2.3.1.	ENTRENAMIENTO.....	29
10.2.3.2.	CLASIFICACIÓN	30
10.2.3.3.	VALIDACIÓN	30
10.3.	CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES: ...	30
10.3.1.1.	ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	30
10.3.1.2.	PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES SENTINEL-2.....	31
10.3.1.3.	REMUESTREO Y CORTE DE LA IMAGEN.....	32
10.3.1.4.	DETERMINACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRENAMIENTO	32
10.3.1.5.	CLASIFICACIÓN	32
10.3.1.5.1.	VALIDACIÓN	33
10.4.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODIVERSIDAD Y VARIABLES DE INTERÉS.....	33
10.4.1.	SISTEMA DE DRENAJE	33
10.4.1.2.	DETERMINACIÓN DE LAS DIRECCIONES DE FLUJO.....	33
10.4.1.3.	DETERMINACIÓN DE LAS ACUMULACIONES DE FLUJO	34
10.4.1.4.	PASO DE RASTER DE ACUMULACIONES DENTRO DEL UMBRAL A RED DE DRENAJE VECTORIAL	34
10.4.2.	MAPA PENDIENTES Y CURVAS DE NIVEL.....	34
10.4.3.	GEOMORFOLOGÍA y GEOLOGÍA.....	35
10.4.4.	CLIMA	35
10.4.4.1.	TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA.....	35
10.4.4.1.1.	ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	35
10.4.4.1.2.	PRE PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN MULTIESPECTRAL LANDSAT 8 OLI (CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA)	35
10.4.4.1.3.	CÁLCULO DE TEMPERATURA DE BRILLO	35
10.4.4.1.4.	CÁLCULO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA	36

10.4.4.2. PRECIPITACIÓN.....	36
11. RESULTADOS	36
11.1. ADQUISICIÓN DE DATOS “IN SITU” O INVENTARIO EN CAMPO	36
11.2. CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES HIPERESPECTRAL.....	38
11.3. CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES	44
11.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODIVERSIDAD Y VARIABLES DE INTERES.....	49
12. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	64
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
14. BIBLIOGRAFÍA.....	67

TABLA DE ILUSTRACIONES:

Figura 1 - Codificación de dirección de flujo. Fuente: Página oficial ArcGIS.....	17
Figura 2- Zona de estudio	22
Figura 3-Vista panorámica de la zona de estudio.	23
Figura 4 - Recorrido en mula por el PNN Los Nevados.	37
Figura 5 - Trabajo en campo.	37
Figura 6 - Espécimen arbustivo representativo.	37
Figura 7 - Imagen hiperespectral corregida de la zona de estudio.....	39
Figura 8 - Ejemplificación de firma espectral del bosque (175 bandas).	40
Figura 9 - Clasificación de la imagen hiperespectral.....	41
Figura 10 - Imágenes multiespectrales corregidas de la zona de estudio.	44
Figura 11 - Ejemplificación de firma espectral del bosque (10 bandas).	45
Figura 12 - Clasificación de la imagen multiespectral.....	47
Figura 13 - MDE previamente llenado.	50
Figura 14 - Resultado de las direcciones de flujo.....	50
Figura 15 - Resultado de las acumulaciones de flujo.	51
Figura 16 - Red de drenaje de la zona de estudio.....	52
Figura 17 - Mapa de pendientes de la zona de estudio.	53
Figura 18 - Mapa de curvas de nivel de la zona de estudio.	54
Figura 19 - Relación espacial entre las curvas de nivel y las clases.	55
Figura 20 - Mapa de geología de la zona de estudio. Fuente de información: WWF - Colombia	59
Figura 21 - Temperatura de brillo de la zona de estudio.....	60
Figura 22 - Temperatura superficial de la tierra.	61
Figura 23 - Relación espacial entre la temperatura superficial de la tierra y las clases.	62

TABLA DE TABLAS:

Tabla 1 - Información de la imagen hiperespectral de la zona de estudio.....	27
Tabla 2 - Datos de imágenes multiespectrales Sentinel-2.....	30
Tabla 3 - Información sobre el DEM de la zona de estudio.....	33
Tabla 4 - Información de las imágenes Landsat-8.....	35
Tabla 5 - Datos recolectados en campo.....	37
Tabla 6 - Áreas y porcentajes por clase, en la clasificación de la imagen hiperespectral.....	42
Tabla 7 – Matriz de confusión de la clasificación de la imagen hiperespectral.....	42
Tabla 8 - Porcentaje de casos de clasificación correctos.....	43
Tabla 9 - Índice de precisión de la clasificación Kappa.....	44
Tabla 10 - Longitud de onda y resolución por banda de las imágenes Sentinel-2.....	45
Tabla 11 - Áreas y porcentajes por clase, en la clasificación de la imagen multiespectral.....	46
Tabla 12 - Matriz de confusión de la clasificación de la imagen multiespectral.....	48
Tabla 13 - Porcentaje de casos de clasificación correctos.....	49
Tabla 14 - Índice de precisión de la clasificación Kappa.....	49
Tabla 15 - Rangos de pendientes y porcentajes de equivalencia.....	53
Tabla 16 – Clases predominantes entre rangos de curvas de nivel en la clasificación de la imagen hiperespectral.....	56
Tabla 17 - Clases predominantes entre rangos de curvas de nivel en la clasificación de la imagen multiespectral.....	57
Tabla 18 - Clases predominantes entre rangos de temperatura superficial de la tierra en la clasificación de la imagen hiperespectral.....	63
Tabla 19 - Clases predominantes entre rangos de temperatura superficial de la tierra en la clasificación de la imagen multiespectral.....	63

1. RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un inventario forestal en el ecosistema de páramo Paramillo de Santa Rosa a partir de técnicas de percepción remota, para la identificación de variables que describen las dinámicas de este ecosistema; las variables que influyen en la biodiversidad, utilizadas en este proyecto fueron: el sistema de drenaje, las direcciones de flujo, las pendientes y curvas de nivel generadas a partir de un modelo de elevación digital; la información sobre la geología y la geomorfología de la superficie fue descrita a partir del plan de manejo 2017-2022 del Parque Nacional Natural Los Nevados; la variable del clima se desarrolló a partir del cálculo de la temperatura superficial de la tierra, aplicando también las técnicas de percepción remota donde luego del cálculo de la temperatura de brillo se calcula la temperatura superficial de la zona de estudio.

Se desarrolló una metodología basada en el aprovechamiento de las técnicas de percepción remota que permitieron aplicar el pre procesamiento a la imagen multiespectral por medio del algoritmo Absorción diferencial Precorregida Atmosférica (APDA) y a la imagen hiperespectral por medio del algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) obteniendo imágenes con reducción del ruido atmosférico listas para aplicar la clasificación supervisada por medio del método de Mapeo de Angulo Espectral, que parte de la hipótesis de que cada pixel corresponde únicamente a una categoría de referencia; para determinar a cuál pertenece cada pixel, calcula la similitud entre las firmas espectrales, las cuales están en función del número de bandas, midiendo el ángulo entre ellas; esta clasificación de comunidades de especies forestales representativas de la zona de estudio fue aplicada a dos fuentes de información, una imagen multiespectral y una imagen hiperespectral, se realizó la validación de los resultados obtenidos de las clasificaciones basándose en la información obtenida de las muestras recogidas en campo y aplicando la matriz de confusión, de la que se generaron los índices global y Kappa con valores de 0,838 y 0,822 para la clasificación de la imagen multiespectral y 0,795 y 0,772 para la clasificación de la imagen hiperespectral.

Finalmente se evidenció la relación que teóricamente existe entre las variables y lo que arroja la clasificación efectuada anteriormente.

2. INTRODUCCIÓN

Un requisito indispensable para la comprensión de cualquier ecosistema es la construcción del conocimiento base, ya que permite estructurar políticas que permitan su conservación [1]. En el caso de los ecosistemas de páramo, esta línea base debe estar compuesta de un gran número de variables que describen sus dinámicas; estas variables abarcan la localización, el clima, geología, geomorfología, suelo, usos de la tierra, topografía, actividades que se desarrollan, biota, entre otras [1].

Por una parte, una gran cantidad de conocimiento de los ecosistemas de bosque, está integrado en el Inventario Forestal Nacional de Colombia (IFN) que contiene información espacial y estadística unificada sobre diversas variables de sumo interés en los bosques colombianos que facilitan el monitoreo de dichas zonas [2]. Sin embargo, según el IDEAM (2015) Colombia no ha implementado un inventario forestal formal, ni cuenta con una metodología estandarizada, como tampoco ha establecido variables que contribuyan al reconocimiento de la oferta natural de sus ecosistemas.

La historia ambiental del país ha estado ligada con el conocimiento sobre la oferta y el estado de los bosques. En la actualidad la información y el conocimiento sobre los bosques nacionales, son elementos estratégicos para la toma de mejores decisiones, basadas en la información oportuna, confiable, consistente y comparable que permita un mejor juicio sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales [2].

El conocimiento del páramo es de gran importancia ecosistémica y requiere de especial atención y de conocimiento, ya que regulan el ciclo hidrológico y el clima, absorben gas carbónico, entre otras bondades, sin embargo, sufren fuertes transformaciones, contaminación, vulnerabilidad al cambio climático, pérdida de especies [3].

Dentro de la construcción de ese conocimiento del ecosistema de páramo, la caracterización de especies y la adquisición de variables como composición y estructura de las unidades forestales, juegan un papel preponderante; algunas de estas variables están siendo determinadas con metodologías de percepción remota [4]. En particular, los sensores hiperespectrales proporcionan información espectral valiosa que puede usarse para discriminar diferentes clases de interés, aunque no proporcionan información estructural y de elevación [5].

A partir de la percepción remota es posible realizar clasificaciones de usos del suelo para analizar su comportamiento en el tiempo [6], analizar la distribución y comportamiento de la temperatura superficial [7], generar modelos digitales de elevación (MDE) para la extracción de las características topográficas [8], como el sistema de drenaje y cuencas hidrográficas [9], entre muchos otros estudios.

En este trabajo se aprovechan las diversas bondades de la percepción remota y se realiza la clasificación de las comunidades de especies forestales representativas del Paramillo de Santa Rosa, con dos fuentes de información, como lo son las imágenes hiperespectrales e imágenes multiespectrales.

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Desarrollar un inventario arbóreo en ecosistemas de Páramo a partir de técnicas de percepción remota.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar el conjunto de parámetros a utilizar para la realización de un inventario arbóreo en ecosistemas de páramo.
- Determinar a partir de técnicas de percepción remota, los parámetros del inventario en ecosistemas de páramo.
- Validar los resultados del inventario arbóreo en ecosistemas de páramo, a partir de datos tomados en campo.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La construcción de un conocimiento base es de suma importancia para el entendimiento del páramo y así mismo para estructurar y determinar pasos para su conservación y debe estar compuesto de un gran número de variables que tienen un impacto y visualización en el espacio y que permiten comprender las dinámicas que se evidencian de un ecosistema tan indispensable como el páramo; estas variables abarcan la localización, el clima, geología, geomorfología, suelo, usos de la tierra, topografía, actividades que se desarrollan y biota [1].

Un inventario forestal de manera general consiste en la recopilación y análisis de variables biométricas y factores de biodiversidad sobre un área de bosque, que permite identificar sitios de mayor importancia para la conservación, restauración, reforestación, uso sostenible etc. [10].

El inventario forestal nacional de Colombia (IFN) surge tras la necesidad de información sobre diversas variables de suma importancia en los bosques colombianos mediante una

operación espacial y estadística unificada, para la toma de cualquier decisión y planificación [2].

Colombia cuenta con más de 40 años de experiencia en la recopilación y divulgación de información forestal, por medio del SNIF (El Sistema Nacional de Información Forestal), el cual contiene información de los ecosistemas boscosos nacionales, como: la ubicación, volumen anual aprovechado, principales especies, uso actual y potencial de las especies forestales, depósito de biomasa y carbono almacenado, información básica de monitoreo de bosques con sistemas de información geográfica (SIG) e imágenes de satélite, etc., según el IDEAM; sin embargo dicha información recolectada y la metodología empleada no está disponible para todo el público, únicamente para personal autorizado.

A pesar de este largo periodo de experiencia y el aval del Protocolo nacional de bosques para el monitoreo y seguimiento a los bosques, Colombia «es uno de los pocos países tropicales que no ha implementado formalmente un Inventario Forestal a escala nacional, con una metodología estandarizada y variables establecidas como fuente fundamental de información sobre la situación y la oferta natural de estos importantes ecosistemas», reconocen desde el IDEAM [11].

El IDEAM diseñó un extenso y preciso modelo metodológico para la realización de un inventario nacional unificado en el 2009, donde están comprendidos todos los pasos para su desarrollo, dentro de los que se encuentra recolección “in situ” y extracción de variables con cartografía 1:10000 con tamaño de cuadrícula de 1 km² [2].

Según el IDEAM para el año 2015 se tenía planeado implementar la primera fase de la propuesta metodológica para el 10% de la línea base de las parcelas previamente seleccionadas en una muestra de 147 de 1479, para la realización del levantamiento en campo y análisis de la información [11]. Los reportes de la información adelantada del IFN, habrían de ser divulgados bajo plataforma web y se planeaba terminar la línea base escogida entre el 2016-2017 [10]. Lo cual en la página del IDEAM sobre el inventario forestal nacional no se encuentra registrado al contar con dos boletines 2008-2010 y 2011, de información forestal.

Este adelanto se plantea tras la actualización del modelo metodológico en 2014 con inclusión de imágenes de satélite como lo aseguran los expertos del IDEAM según informes en el 2015, sin embargo, en los medios de difusión pública no se encuentran reportes más recientes, por lo que los adelantos y temas relacionados con teledetección planteados para Colombia por el IDEAM son muy inciertos.

Si bien es cierto que la implementación de esta metodología es incierta, el páramo es de gran importancia ecosistémica y requiere de especial atención y de conocimiento, ya que regulan el ciclo hidrológico y el clima, absorben gas carbónico, entre otras bondades; Sin embargo se evidencian indicios de poblamiento que no se pueden ignorar, lo que provoca

transformaciones en los ecosistemas, contaminación, vulnerabilidad al cambio climático, pérdida de especies, etc., por lo que su conocimiento se convierte en pieza clave para conservación y restauración de los mismos según [3].

Se evidencia entonces un panorama nacional incierto, con un estricto y completo marco metodológico de la ejecución de un inventario forestal pero sin resultados tangibles, técnicas que no concuerdan con las tecnologías disponibles y una gran cantidad de herramientas de posible utilización; Surge entonces la pregunta, ¿De qué manera se puede realizar un inventario forestal con técnicas actuales y eficaces, que cumpla con el propósito de ser una herramienta para la toma de decisiones que propendan por el beneficio del ecosistema boscoso, su preservación y uso óptimo?.

5. JUSTIFICACIÓN

Alrededor del 40% de la economía mundial depende directamente de la biodiversidad, en particular los sectores agrícola y forestal. La biodiversidad produce asimismo servicios ecosistémicos vitales, como el abastecimiento de agua potable y la fertilidad de los suelos. El 70% de los pobres del mundo vive en zonas rurales y depende directamente de la biodiversidad para su supervivencia y bienestar [5]. Por lo que se hace evidente la importancia de conocer e identificar los recursos forestales para potenciar y preservar su uso.

El ecosistema de páramo está conformado por casi dos millones de hectáreas que equivale al 2% del territorio nacional y abastece al 70% de los colombianos ya que regula el ciclo hídrico; contiene un número importante de especies tanto de fauna como de flora, con un 90% de flora endémica; Adicionalmente, los páramos permiten el almacenamiento de gas carbónico, regulan el clima regional, contienen especies polinizadoras y lugares sagrados para culturas ancestrales [3].

Aunque la biodiversidad, los ecosistemas y los servicios ecosistémicos asociados presentan cambios y transformaciones espontáneas, hoy en día, debido a las actividades humanas, esa tendencia ha superado los umbrales de estabilidad y cambio, amenazando el bienestar de la sociedad [12]. Las actividades antrópicas actúan como motores directos de transformación y pérdida de la biodiversidad, de los cuales la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, ha identificado cinco a nivel global: Transformación y pérdida de ecosistemas y hábitats naturales, sobreexplotación, invasiones biológicas, contaminación y cambio climático [12].

En Colombia la propuesta para abordar estos 5 motores de transformación, es a través de la Política Nacional de Gestión Integral de Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos

(PNIGIBSE) cuyo objetivo es “Promover la Gestión Integral para la Conservación de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos, de manera que se mantenga y mejore la resiliencia de los sistemas socio-ecológicos, a escalas nacional, regional y local, considerando escenarios de cambio y a través de la acción conjunta, coordinada y concertada del Estado, el sector productivo y la sociedad civil”.

Una de las constantes preocupaciones a lo largo de la historia ambiental del país es el conocimiento sobre la oferta y el estado de los bosques. Es claro, entonces que la información y el conocimiento sobre los bosques colombianos, son elementos estratégicos para la toma de mejores decisiones, que deben ser tomadas basadas en la información oportuna, confiable, consistente y comparable que permita un mejor conocimiento sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales [2]. Para la obtención de esta información existen diferentes metodologías dentro de las cuales se definen los inventarios forestales, que permite obtener información precisa sobre su distribución, estructura y composición, entre otras [2].

Un inventario forestal tiene como objetivo medir, describir y evaluar los ecosistemas de bosques, con el fin de producir y proveer información del estado de la superficie, orientado a la ordenación con fines de administración de los recursos, para dar un soporte a las decisiones tomadas durante la formulación e implementación de políticas nacionales ambientales y sectoriales [2]. Un alcance de gran importancia que se plantea para los inventarios forestales es que la información se provee a diferentes usuarios que tengan el objetivo de contribuir al monitoreo y seguimiento de los bosques y a las políticas nacionales ambientales involucradas [2].

6. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se encuentran todos aquellos términos, definiciones o líneas que hacen parte de este proceso de investigación:

- **Espectro de luz:**

Para definir espectro de luz, se parte del hecho de la concepción de luz como onda electromagnética y no como partícula, la cual está diferenciada por la longitud de onda y por la frecuencia, visible y no visible, dentro de las que se destacan de menor a mayor longitud de onda, los rayos x, el ultravioleta, la luz visible, ondas de radio, infrarrojo.

- **Teledetección:**

Detección a distancia de información que se produce en la superficie de la Tierra y sobre otros astros solares, que se realiza mediante satélites y sondas artificiales. Ésta es

determinada a partir de los sensores remotos que indican las medidas y análisis de la radiación electromagnética reflejada desde, transmitida a través de, o absorbida y dispersada por la atmósfera, la hidrosfera y los objetos en o cercanos a la superficie terrestre.

- **Firma espectral:**

Cada objeto tiene una respuesta diferente a la radiación solar que depende del porcentaje que se refleja, absorbe y se transmite; la reflectancia de un objeto en función del número de bandas permite la construcción de una firma, dicha firma espectral contiene entonces la medida de las propiedades espectrales de dicho objeto en el rango espectral estudiado.

- **Imágenes multiespectrales e hiperespectrales:**

Las imágenes hiperespectrales están compuestas de un enorme número de bandas monocromáticas o imágenes monocromáticas, donde cada pixel contiene una información dentro de un rango específico, conocido como resolución radiométrica, que representan una zona, con la enorme ventaja de contener información más allá del rango de luz visible, como el infrarrojo, suministrando información que el ojo humano no puede observar. Las imágenes multiespectrales por su parte poseen un número de bandas más reducidas y más distantes entre una y otra en el espectro de luz.

- **Resolución espacial:**

La resolución espacial hace referencia al tamaño real del píxel en una imagen, lo que se traduce en el nivel de detalle y representación de una zona a estudiar, es decir, un tamaño de píxel más reducido simboliza un mayor número de características de un lugar, al aumentar se comienza a generalizar todo lo que hay comprendido en el píxel en un solo valor digital, provocando en la mayoría de los casos pérdidas de información espacial y espectral.

- **Resolución radiométrica:**

La resolución radiométrica o también denominada rango dinámico hace referencia al número de niveles de voltaje que son medidos en cada banda de la imagen. Cuando este número es mayor, mayor es el detalle con que se podrá representar la variabilidad radiométrica de una superficie para una banda dada. Este número se expresa comúnmente en términos de dígitos binarios (bits) necesarios para almacenar el valor máximo para cada caso considerado.

Un bit es la unidad fundamental de un sistema binario que posee sólo los valores 1 y 0, por lo tanto, usando un arreglo de bits puede representar un número cualquiera. El número de valores que pueden ser representados por una serie de dígitos es $x \cdot n$, donde x es el número de valores que cada dígito puede representar y n es el número de dígitos usados. Así, en una

base binaria el número de valores será 2^n . Por ejemplo, para 5 bits son 32 valores, para 8 bits 256 valores, para 11 bits 2048. Por tanto, esos son los niveles de voltaje o valores de intensidad radiométrica registrados por el sensor.

- **Resolución temporal:**

La resolución temporal es la periodicidad con que el sensor adquiere las imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (ángulo de observación y ángulo de cobertura). El ciclo de recubrimiento es el tiempo que tarda el sensor en pasar sobre la misma porción de la Tierra, el periodo orbital es el tiempo que él tarda en circundar la tierra.

- **Resolución espectral:**

La resolución espectral hace referencia a la distancia existente entre bandas contiguas, es decir, que lo separa esta valor o rango de espectro de luz; Esto quiere decir que a menor distancia se tiene mayor información espectral es una zona lo que se convierte en una mejor caracterización de los elementos en la superficie. Usualmente, cuando mejor es la resolución espectral, menor es el rango del espectro y mayor es el número de bandas y cuando la distancia entre bandas es mayor, el rango de espectro se hace cada vez más grande con un menor número de bandas.

- **Radiancia:**

La radiancia de forma puntual representa la cantidad de flujo de energía radiante en una unidad de tiempo determinada por la unidad de longitud de onda radiada en un cono que surge de un punto hasta una superficie. Está expresada en $W/(m \cdot sr)$.

- **Reflectancia:**

La reflectancia espectral de una superficie es la relación entre el flujo radiante incidente y el flujo radiante reflejado en una única longitud de onda en condiciones geométricas fijas. Es una magnitud adimensional y se define de 0 a 100% o como factor de 0 a 1. Estos son valores relativos y para muestras no fluorescentes, son independientes de la calidad y cantidad de la luz usada para iluminar la muestra.

- **Topografía:**

Hace referencia al relieve de una superficie. El relieve de un terreno comprende los elementos naturales y/o artificiales dentro del mismo. La representación en mapas está dada por coordenadas planas (X, Y) y una variable de altura o elevación del terreno (Z). Esto permite conocer el comportamiento de la zona de estudio en cualquier punto del espacio. La topografía se representa por modelos digitales de elevación o superficie.

- **Modelo Digital de Elevación (MDE):**

Los MDE son representaciones matriciales tipo raster que poseen información de coordenadas planas asociadas a una altura de manera que se evidencie tanto visual como matemáticamente y permita conocer el relieve de determinada zona. La resolución depende de los datos con los que se fabrica y está en función del tamaño del pixel.

- **Inventario forestal:**

El inventario forestal es la herramienta mediante la cual se obtiene información cualitativa y cuantitativa necesaria y específica de los ecosistemas de bosque, para su posterior manejo y utilización en planeación, ordenación, conservación, reforestación, con un nivel de precisión, exactitud y detalle requeridos.

Un inventario forestal se compone de variables como: área, ubicación, tipos de bosque presentes, estructura, calidad, condiciones, volumen, tamaño, composición, etc. variables que dan pie a una publicación del inventario, con el respectivo error y nivel de detalle, para el posterior uso de esta información.

- **Heterogeneidad espacial:**

Este es un criterio con el que se puede identificar a la zona de estudio en función de alguna variable, en este caso de la clasificación de especies o comunidades de especies, indicando que tanto una determinada categoría se distribuye uniformemente en el espacio o de lo contrario no parece tener agrupaciones espaciales, en caso de no tenerlas se habla de heterogeneidad espacial.

- **Red de drenaje superficial:**

La red de drenaje en un terreno indica por donde circula el agua de forma natural fruto de la precipitación en la zona, y está ligada a diferentes variables como la topografía, la dirección de los flujos, las acumulaciones en la zona, la porosidad en el suelo, etc. Que indican por donde y hasta que categoría se establece la red de drenaje debido al orden de los flujos.

- **Geología:**

La geología comprende toda la información asociada con la composición del suelo o subsuelo y demás características como el origen, formación, distribución y las transformaciones de la zona de estudio

- **Geomorfología:**

La geomorfología habla sobre la superficie terrestre en la zona de estudio, en temas tales como el relieve, la tectónica, los procesos de formación o modificación; es decir, contiene

información sobre la representación del suelo, como montañas, fallas, valles, y demás información que hable sobre su formación.

- **Uso de la tierra:**

Incluye la información sobre el uso que se le da a determinada zona que puede ser dado de forma natural o artificial y que puede entrar dentro de una determinada categoría.

- **Gradientes altitudinales:**

El gradiente altitudinal indica una tasa de cambio que existe de una determinada variable, como por ejemplo la temperatura, en este caso en función de la altitud en una terminada zona.

- **Páramo:**

Es un ecosistema montano intertropical clasificado biogeográficamente como pradera y matorral de montaña, están ubicados generalmente desde altitudes de aproximadamente 2700 msnm hasta los 4000 o 5000 msnm, en zonas montañosas ubicadas en latitudes tropicales. Se clasifican según la altura y temperatura en:

- Subpáramo: conformado por bosques montanos, muchos arbustos y árboles bajos, con una temperatura promedio de 10°C.
- Páramo: domina la vegetación frailejonal-pajonal y pastizales, con una temperatura promedio de 5°C.
- Superpáramo: Considerado como una tundra andina, presenta musgos, pastizales, líquenes y vegetación abierta de pequeños arbustos, con una temperatura promedio de 2°C.

- **Clasificación forestal:**

La clasificación forestal depende del enfoque del inventario forestal, puede ser desde lo investigativo, usos, de acuerdo al área de influencia, tipo de vegetación, de prevención o manejo. La clasificación surge después de la obtención de las variables que conforman el inventario forestal anteriormente mencionado, dividiendo por áreas que comprendan un rango de la característica estudiada, si es de tipo cuantitativa o una específica si es de tipo cualitativa.

- **Especie de árbol:**

Una especie arbórea es la clasificación que recibe un individuo vegetal, en este caso árboles, de acuerdo su caracterización, dependiendo de la hoja, fruto, flor, altura, corteza, estructura, ecosistema, entre otros.

- **Clasificación supervisada:**

Es un método definido como un proceso en el que píxeles de identidad conocida se utilizan para reconocer píxeles de identidad desconocida. Involucra las siguientes operaciones: entrenamiento, selección y aplicación del algoritmo de clasificación, y post clasificación. Por lo tanto, este método parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan muestras que sirven para “entrenar” al algoritmo en la búsqueda de elementos de interés o categorías a través de la imagen. A partir de los sitios de entrenamiento se caracteriza espectralmente cada una de las categorías, para que en la siguiente fase de clasificación se asigne una categoría a cada píxel de la imagen en función de la similitud de su curva espectral con los patrones de referencia extraídos de los sitios de entrenamiento.

7. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta de manera integrada el tema de la investigación, a partir de las teorías, modelos y enfoques que permiten generar la solución al problema planteado:

7.1. CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA

El proceso consiste en la conversión de los números digitales de la imagen a valores de radiancia, haciendo uso de los valores de pixel, máximos y mínimos, la cuantificación de los valores de pixeles calibrados y la radiancia máxima y mínima del sensor.

Para obtener los valores de radiancia se hace uso de la siguiente ecuación [7]:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax\lambda} - Q_{calmin\lambda}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

Dónde:

L_{λ} = Radiancia espectral del sensor (W/m² sr μm).

Q_{cal} = Cuantificación del valor del pixel calibrado.

Q_{calmin} = Mínima cuantificación del valor del pixel calibrado correspondiente al valor de radiancia mínima.

Q_{calmax} = Máxima cuantificación del valor del pixel calibrado correspondiente al valor de radiancia máxima.

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral mínima del sensor.

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral máxima del sensor.

7.2. ALGORITMO FLAASH

EL algoritmo FLAASH inicia a partir de una ecuación estándar para la radiancia espectral (L) en un píxel, que se aplica a la gama de la longitud de onda [13]:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1-\rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a \quad (2)$$

Donde:

ρ es la reflectancia de la superficie de píxeles.

ρ_e Es la reflectancia media de la superficie del píxel y la región que lo rodea.

S es el albedo esférico de la atmósfera.

L_a Es la radiancia emitida por la atmósfera.

A y B son coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y geométricas, pero no de la superficie.

La ecuación (2) se resuelve para la reflectancia de la superficie. El método de solución implica el cálculo del promedio de la radiancia, de la cual se calcula una reflectancia promedio a partir de:

$$L_e = \left(\frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a \quad (3)$$

7.3. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES SENTINEL-2 CON LA HERRAMIENTA SEN2COR

Los pasos principales para el procesamiento Sen2Cor son la detección de nubes y la clasificación de la imagen, seguido de la recuperación del Grosor Óptico de Aerosol (AOT) y el contenido de Vapor de Agua (WV) de la imagen sin corrección atmosférica [14]; el resultado final de esos pasos será entonces el paso de la reflectancia del tope de la atmosfera a la superficie del terreno.

Internamente para la adquisición de los parámetros atmosféricos del modelo, Sen2Cor utiliza el algoritmo APDA (Absorción Diferencial Pre-correctada Atmosférica) para obtener el vapor de agua de la imagen sin corregir, relacionando las bandas 8 y 9; y el método de recuperación de píxeles de Vegetación oscura densa (DDV) de Kaufmann para obtener el espesor óptico en aerosol (AOT).

Más ampliamente el algoritmo APDA, según [15] está conformado por dos partes esenciales, la primera es la pre-corrección atmosférica y la segunda las técnicas de absorción diferencial. Para comprender esa primera parte se debe tener claro que la radiancia a nivel del sensor L_s , está en función de la radiancia reflejada en el suelo L_{gnd} y la radiancia atmosférica L_{atm} , expresada como:

$$L_s(\rho, h) = L_{gnd}(\rho, h) + L_{atm}(h) \quad (4)$$

En donde la radiancia atmosférica es sensible a la cantidad de aerosol y contenido de vapor de agua, los cuales dependen de la altitud del terreno (h). Se deben recuperar los contenidos de vapor de agua, ya que el segundo término de la radiancia a nivel del sensor, compensa la refracción del suelo al primer término [48]. Para obtener esos datos de vapor de agua de una mejor manera se efectúa una pre-corrección atmosférica lo que asegura entonces que el método APDA, solo se ve influenciado por el vapor de agua y no por la reflectancia del suelo.

En la segunda parte, las técnicas de absorción diferencial permiten determinar los contenidos de gas por medio de una relación entre canales de absorción y de proximidad [15]; con canales de referencia a ambos lados de la banda de absorción se puede obtener la pendiente de la reflectancia, dicha relación se denomina “relación de banda interpolada continua” (CIBR) y esta expresada como:

$$R_{CIBR} = \frac{L_m}{\omega_{r1} * L_{r1} + \omega_{r2} * L_{r2}}, \quad \text{Donde } \omega_{r1} = \frac{\lambda_{r2} - \lambda_m}{\lambda_{r2} - \lambda_{r1}} \quad \text{y} \quad \omega_{r2} = \frac{\lambda_m - \lambda_{r1}}{\lambda_{r2} - \lambda_{r1}} \quad (5)$$

Donde L_m es la radiancia del canal de absorción en la longitud de onda central λ_m , L_{r1} y L_{r2} , son radiancias de los canales de referencia en las longitudes de onda λ_{r1} y λ_{r2} . El ruido del sensor no permite una medición precisa de los contenidos de gases, por lo que se aumenta el número de canales de referencia seleccionados y se relacionan mediante una regresión lineal (LIRR):

$$R_{LIRR} = \frac{\overline{L_m}}{LIR([\lambda_r], [L_r])|_{\overline{\lambda_m}}} \quad \text{y} \quad R_{APDA} = \frac{\overline{L_m - L_{atm,m}}}{LIR([\lambda_r], [L_r - L_{atm,r}])|_{\overline{\lambda_m}}} \quad (6) \text{ y } (7)$$

Donde $\overline{L_m}$ es la media de la señal del canal de absorción en $\overline{\lambda_m}$, y $LIR([x], [y])$ es una regresión lineal. Cuando al modelo se le resta la radiancia atmosférica no reflejada en el suelo a la radiancia del sensor, es decir, la pre-corrección atmosférica, ese se convierte en APDA.

7.4. REDUCCIÓN DE DIMENSIONALIDAD

El fundamento teórico para la reducción de la dimensionalidad de las imágenes hiperespectrales está dado por el método de **Análisis de Componentes Principales** (ACP).

El proceso inicia con la representación de la imagen como una matriz bidimensional de los niveles digitales de los n píxeles en p bandas [16].

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{2n} \\ X_{p1} & X_{p2} & X_{pn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La i -ésima fila de la matriz contiene los n niveles digitales de la i -ésima banda. Denominando $X_i = [x_{i1} \ x_{i2} \dots x_{in}]^t$ para $i=1, 2, \dots, p$, resulta $X^t = [X_1, X_2, \dots, X_p]$.

El estudio de la relación entre las bandas de la imagen hiperespectral se realiza a partir de la matriz de varianza y covarianza Σ_x :

$$\Sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{2p} \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \sigma_{pp} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Como los componentes principales son nuevas variables Y_1, Y_2, \dots, Y_p que se obtienen como combinaciones lineales de las variables originales, es decir de las bandas:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1^t X = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p \\ Y_2 &= a_2^t X = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p \\ Y_p &= a_p^t X = a_{1p}X_1 + a_{2p}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \end{aligned} \quad (10)$$

Por lo tanto, tienen:

$$Var(Y_i) = a_i^t \Sigma_x a_i \text{ y } Cov(Y_i, Y_k) = a_i^t a_k^t \quad (11) \text{ y } (12)$$

De todas las combinaciones lineales posibles, los componentes principales son aquellas que no están correlacionadas y tienen máxima varianza. Como la varianza se incrementa multiplicando el vector de coeficientes a_i por una constante, para que esta combinación lineal sea única es conveniente usar los vectores de coeficientes normalizados, es decir con longitud 1 ($a_i^t a_i = 1$).

De esta manera:

- Primer componente principal = combinación lineal ($a_1^t X$) que maximiza

$$Var(a_1^t X) \text{ sujeto a que } a_1^t a_1 = 1.$$

- Segundo componente principal = combinación lineal ($a_2^t X$) que maximiza

$$\begin{aligned} &\text{Var} (a_2^t X) \text{ sujeto a que } a_2^t a_2 = 1 \\ &\text{y que } \text{Cov} (a_1^t X, a_2^t X) = 0 \end{aligned}$$

⋮

- i-ésimo componente principal = combinación lineal ($a_i^t X$) que maximiza

$$\begin{aligned} &\text{Var} (a_i^t X) \text{ sujeto a que } a_i^t a_i = 1 \\ &\text{y que } \text{Cov} (a_i^t X, a_k^t X) = 0 \text{ para } k < i \end{aligned}$$

7.5. REMUESTREO DE LAS IMÁGENES

Se interpola para obtener una imagen de mejor resolución que la que se posee, existen diversos métodos para lograr ese fin, dentro de los que se encuentra el bicúbico, en el cual se tienen en cuenta 16 vecinos cercanos del pixel a evaluar; para un punto (x, y) a remuestrear [17], se sigue la siguiente formula:

$$v(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (13)$$

Donde los 16 coeficientes se calculan con las 16 ecuaciones que surgen de los 16 vecinos de cada punto. Este método conserva mucho mejor los detalles finos en comparación con el modelo bilineal [17].

7.6. TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

Inicialmente la temperatura superficial de la tierra está dada por la ecuación (15) [7], ya que se puede transformar de radiancia a temperatura de brillo:

$$TB = \frac{K_2}{\ln \left(1 + \frac{K_1}{B(T)} \right)} \quad (14)$$

Donde TB es la temperatura de brillo, K_2 y K_1 son constantes de calibración en Kelvin y $B(T)$ es la radiancia espectral de la atmosfera.

De la temperatura de brillo se deriva la temperatura superficial de la tierra que está dada por:

$$LST = \frac{TB}{1 + W * \left(\frac{TB}{P} \right) * \ln(\varepsilon)} \quad (15)$$

Donde T_B es la temperatura de brillo, W es la longitud de onda de la banda, p es la constante de Planck y ϵ la emisividad, ϵ a su vez esta expresada por la ecuación (10): $\epsilon_{10} = 0.973 - 0.047$ y $\epsilon_{11} = 0.984 - 0.026$, para las bandas térmicas 10 y 11 respectivamente según [39], donde P_V es la fracción de vegetación en un pixel, calculada [18] usando la ecuación:

$$P_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (16)$$

Donde $NDVI$ es el índice de vegetación normalizado, $NDVI_{min}$ el índice de vegetación normalizado mínimo y $NDVI_{max}$ el máximo.

7.7. ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADO

Se utiliza ampliamente para discriminar entre diferentes condiciones y cubiertas vegetales [19]. Se calcula de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (17)$$

Donde ρ_{NIR} representa el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y ρ_R representa el valor para la banda del rojo. El índice empleando datos hiperespectrales, ρ_{NIR} representa el valor infrarrojo cercano de 750 nm y ρ_R el del rojo de 705 nm.

7.8. RED DE DRENAJE

Los modelos digitales de elevación dan lugar a redes de drenaje. Para realizarlo se consideran las direcciones y acumulaciones de flujo en cada pixel utilizando el algoritmo D8 que determina la red con un umbral de acumulaciones basándose en el raster que contiene las elevaciones del terreno y delineando los canales; es importante mencionar que dicho umbral que determinara lo que hace o no hace parte de la red de drenaje, se sugiere que sea el 1% de la acumulación máxima de flujo, aunque existe cierta libertad para su escogencia [9].

La definición de canales de drenaje a partir de un MDE, se basa en operaciones de vecindario donde las decisiones están en función de los valores de ocho celdas adyacentes a la evaluada [20]. Los autores proponen como paso esencial el llenado de depresiones dentro del MDE, para evitar errores en los cálculos de direcciones y acumulaciones de flujo.

Las direcciones de flujo en una celda específica indica la dirección donde fluirá el agua fuera de esta, y su determinación depende de la elevación de las ocho celdas adyacentes a ella y recibe una codificación como se indica en la figura 1, en otras palabras, para un pixel evaluado, la dirección de flujo será el pixel vecino con menor elevación [20].

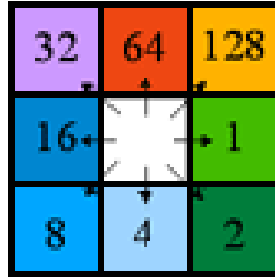


Figura 1 - Codificación de dirección de flujo. Fuente: Página oficial ArcGIS.

Las acumulaciones de flujo dependen de los valores de las direcciones de flujo, a cada celda evaluada se le asigna el número de celdas que fluyen hacia ella, una celda sin acumulación usualmente son parte aguas.

7.9. MAPA DE PENDIENTES

La pendiente en grados, se define como la diferencia de altura $\left(\frac{dZ}{dY}\right)$ sobre la distancia horizontal entre dos puntos $\left(\frac{dZ}{dX}\right)$ [21]; en el caso de convertir un MDE en tipo raster a un mapa de pendientes, el valor que toma cada pixel depende de los ocho pixeles vecinos a él por la técnica de máximo promedio, esto se expresa como:

$$P = \text{Arc tan} \left(\sqrt{\left(\frac{dZ}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dY}\right)^2} \right) \quad (18)$$

Donde P correspondería entonces a la pendiente en grados para cada pixel por el método mencionado y:

$$\frac{dZ}{dX} = \frac{(Z_c + 2\Delta Z_f + Z_i) - (Z_a + 2\Delta Z_d + Z_g)}{8\Delta x} \quad (19)$$

$$\frac{dZ}{dY} = \frac{(Z_g + 2\Delta Z_h + Z_i) - (Z_a + 2\Delta Z_b + Z_g)}{8\Delta y} \quad (20)$$

Con $Z_{j=a...i}$ como la elevación de las ocho celdas vecinas, Δx diferencia horizontal y Δy diferencia vertical entre las celdas.

Existen dos formas de expresar la pendiente, en grados y en porcentaje y matemáticamente se expresan como [22]:

$$Pendiente_{porcentaje} = 100 * \frac{\Delta y}{\Delta x} \text{ y } Pendiente_{grados} = \text{Arc tan} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \quad (21) \text{ y } (22)$$

Por lo anterior se deduce entonces que un mapa de pendientes en porcentaje está regido por la fórmula:

$$P = \sqrt{\left(\frac{dZ}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dY}\right)^2} * 100 \quad (23)$$

Donde P correspondería entonces a la pendiente en porcentaje para cada pixel por el método de máximo promedio y $\frac{dZ}{dX}$ y $\frac{dZ}{dY}$ se encuentran en las fórmulas (28) y (29) respectivamente.

7.10. CURVAS DE NIVEL

Una isolínea conecta por puntos con igual valor, en el caso de que dicho valor corresponda a la elevación del terreno se habla de líneas de contorno o curvas de nivel [22].

Para comenzar a delinear curvas de nivel, el MDE se toma como una matriz de cuadrícula de elevación y se debe designar el punto de inicio de cada una de ellas [23], este se encuentra entonces entre dos puntos de la grilla, uno menor y otro mayor.

Los autores plantean bajo unos supuestos, los posibles candidatos a puntos de inicio; la condición matemática para confirmar si existe un punto con elevación Z , que pertenezca a un intervalo [,] es:

$$(Z - Z_1) * (Z - Z_2) < 0 \quad (24)$$

Para:

$$Z > Z_1 \text{ y } Z < Z_2 \quad (25)$$

O para:

$$Z < Z_1 \text{ y } Z > Z_2 \quad (26)$$

La extracción de las curvas de nivel surge con la implementación del método “árbol de intervalos” [23], este árbol está conformado por un borde horizontal con nodos, los cuales corresponden a intervalos de elevación de la grilla y donde el primer nodo de izquierda a derecha es menor que el segundo. Bajo este mecanismo se evaluarán los intervalos candidatos de las curvas de nivel.

7.11. CLASIFICACIÓN MAPEO DEL ÁNGULO ESPECTRAL

El método de clasificación mapeo del ángulo espectral de una imagen, parte de la hipótesis de que cada pixel corresponde únicamente a una categoría de referencia; para determinar a cuál pertenece cada pixel, calcula la similitud entre las firmas espectrales, las cuales están en función del número de bandas, midiendo el ángulo entre ellas, un ángulo más pequeño indica mayor similitud, matemáticamente se expresa como [24]:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} r_i^2}} \right] \quad (27)$$

Donde nb es el número de bandas de la imagen, t es el espectro del pixel a evaluar, r el espectro de referencia y α el ángulo entre los dos.

7.12. ÍNDICES DE EXACTITUD DE LA CLASIFICACIÓN

La medición de la exactitud de las clasificaciones puede llevar a cabo mediante técnicas descriptivas como las matrices de confusión y los índices que se pueden derivar de ella; la matriz de confusión posee los nombres de las clases en las filas y las columnas y los elementos de la diagonal indican los casos correctamente clasificados y los que están fuera de ella los errores por omisión o comisión, lo que permite extraer el porcentaje de validez por cada clase [25].

Por otro lado, de la matriz de confusión se derivan los índices de exactitud global y Kappa. El primero surge de la división entre el número de casos clasificados correctamente y el total evaluado y el segundo expresa la diferencia que existe entre la exactitud obtenida contra la posibilidad de lograr lo mismo en un clasificador aleatorio, la expresión matemática de ambos índices es:

$$\text{Índice de exactitud global} = \frac{\text{Suma de los valores de la diagonal}}{\text{número de casos evaluados}} \quad (28)$$

$$\widehat{K} (\text{índice Kappa}) = \frac{n \sum_{i=1}^l a_{ii} - \sum_{i=1}^l (a_{i.}, a_{.i})}{n^2 - \sum_{i=1}^l (a_{i.}, a_{.i})} \quad (29)$$

Donde, i indica el número de clases, a_{ii} observaciones de la fila i columna i , columna i ; $a_{i.}$ y $a_{.i}$ es el total marginal de línea i y de columna i y por último n es el número de casos evaluados.

8. MARCO REFERENCIAL

Un inventario forestal de manera general consiste en la recopilación y análisis de variables biométricas y factores de biodiversidad sobre un área de bosque, que permite identificar sitios de mayor importancia para la conservación, restauración, reforestación, uso sostenible etc. [10]. El conocimiento de dichos bosques y en particular del páramo es de gran importancia ecosistémica y requiere de especial atención y de conocimiento, ya que regula el ciclo hidrológico y el clima, la absorción de gas carbónico y sufre fuertes

transformaciones, contaminación, vulnerabilidad al cambio climático, pérdida de especies [3].

Para la obtención de esta información existen diferentes metodologías dentro de las cuales se definen los inventarios forestales, que permite obtener información precisa sobre su distribución, estructura y composición, entre otras [2].

En primera instancia, para aproximarse a identificar las especies de las comunidades arbóreas, los sensores hiper y multiespectrales proporcionan información espectral valiosa que puede usarse para discriminar diferentes clases de interés [5].

En lo referente a la información espectral, las imágenes hiperespectrales son proporcionadas por el escáner Hyperion, que registra en 242 bandas, de ondas que abarcan un amplio rango espectral de 400 a 2500 nm a una resolución de 10 nm, con precisión radiométrica de 12 bits y resolución espacial de 30 m[26].

En el pre-procesamiento de las imágenes hiperespectrales se requiere aplicar procesos como: la corrección atmosférica, la reducción de la dimensionalidad y la corrección geométrica. Gao et al., (2006) y Rani, Ravibabu y Singh, (2016) evaluaron los modelos de QUAC (Quick Atmospheric Correction) y FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) para reducción del efecto atmosférico en las imágenes hiperespectrales y encontraron que el método FLAASH tiene un mejor comportamiento.

[27] aprovecha la alta correlación existente entre bandas consecutivas de una imagen hiperespectral y aplicó el método de análisis de componentes principales (ACP) para la reducción de la dimensionalidad. Con el propósito de georreferenciar las imágenes a un sistemas de referencia determinado y recuperar la forma original del píxel [28] realizó la corrección geométrica aplicando métodos no paramétricos como el polinómico.

[19] utilizó imágenes hiperespectrales para la clasificación supervisada de las especies de las comunidades arbóreas a partir de tres procesos: muestras de entrenamiento, clasificación y validación. En primer lugar, se identificó las diferentes clases presentes en la imagen y tomó los datos de entrenamiento que las representan; Una vez obtenidos estos datos se clasifica la imagen hiperespectral mediante MAE (Mapeo de Angulo Espectral) que, calcula la similitud entre las firmas espectrales [24].

[25], realizaron la validación con datos “in situ”, los cuales surgen tras un registro de la información en dónde se realizó la de recolecta de especímenes (localidad, altitud, hábitat, fecha, frutos, altura etc.) y con un amplio grupo de puntos aleatorios escogidos por clase. Aplicaron la matriz de confusión y el índice Kappa, del índice global para comprobar la exactitud de la clasificación.

Para clasificar una imagen multiespectral Sentinel-2 se le aplican procesos similares, inicialmente se corrigen los efectos atmosféricos con el método Sen2Cor [14], se re-

muestreada por medio del método bicúbico [17], para finalmente efectuar la clasificación por medio del método de mapeo de ángulo espectral [24].

En segunda instancia los factores que influyen en la biodiversidad y que son la base de la construcción de un conocimiento en el páramo, tales como la localización, el clima, geología, geomorfología, usos de la tierra, topografía, etc., [1] también se pueden determinar con técnicas de percepción remota.

Para dar lugar a estas variables existen dos fuentes de información puntuales, imágenes multiespectrales y el Modelo Digital de Elevación (MDE). Las variables que se obtienen con el MDE como la topografía [23], sistema de drenaje [9], mapa de pendientes [21], curvas de nivel [23], etc. Y algunas variables surgen de las imágenes multiespectrales como la temperatura superficial [13], entre otras.

9. DESCRIPCIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio es un ecosistema montano intertropical clasificado biogeográficamente como pradera y matorral de montaña, están ubicados generalmente desde altitudes de aproximadamente 2700 msnm hasta los 4000 o 5000 msnm, en zonas montañosas ubicadas en latitudes tropicales. Se clasifican según la altura y temperatura en:

- Subpáramo: conformado por bosques montanos, muchos arbustos y árboles bajos, con una temperatura promedio de 10°C.
- Páramo propiamente dicho: domina la vegetación frailejonal-pajonal y pastizales, con una temperatura promedio de 5°C.
- Superpáramo: Considerado como una tundra andina, presenta musgos, pastizales, líquenes y vegetación abierta de pequeños arbustos, con una temperatura promedio de 2°C

La delimitación de la zona de estudio se define en función de la cobertura de las imágenes hiperespectrales, multiespectrales y el área representativa de las especies de la zona. Se define una parcelación que facilita la toma de datos y permite el cálculo de otras variables.



Figura 2- Zona de estudio

La zona de estudio es un ecosistema de paramo ubicado en Risaralda, más exactamente el municipio de Santa Rosa de Cabal, que hace parte del Parque Nacional Natural los Nevados. El área de la porción de este paramo, denominado “Paramillo de Santa Rosa” que abarca la imagen hiperespectral es de más de 9000 ha aproximadamente.



Figura 3-Vista panorámica de la zona de estudio.

10. METODOLOGÍA

10.1. ADQUISICIÓN DE DATOS “IN SITU” O INVENTARIO EN CAMPO

En este paso se extraen variables en campo tanto cualitativas como cuantitativas para la clasificación, validación y caracterización, en función de los puntos extraídos de la clasificación anterior y de los casos en los que sea necesario por medio de la observación de la zona; Es importante recalcar que cada uno de los datos recogidos en campo están acompañados de sus coordenadas geográficas.

La recolección de material botánico en campo, su preparación y entrega al herbario para el análisis constituyen parte fundamental de proceso de herborización, a partir de este proceso se recolectaron las diferentes plantas para la identificación de las comunidades y especies [29].

10.1.1. PROCESO DE RECOLECCIÓN

Material utilizado para la recolecta en campo:

- Libreta de campo (de las de topografía).
- Lápiz
- Marcador indeleble.
- Altímetro (opcional).
- GPS.

- Tijeras podadoras.
- Bolsas plásticas (0.6 * 1 m)
- Cinta de enmascarar.
- Papel periódico.
- Cartones (del tamaño de la prensa botánica).
- Prensa botánica.

Inicialmente se identificó visualmente la comunidad y/o la especie de la cual se hará la recolecta, luego se preparó una muestra de herbario, la cual está constituida por una porción de la planta que tiene hojas, flores y/o frutos, ya que estos son los órganos de mayor relevancia para la identificación de las especies. En el caso en el que los especímenes recolectados fueron grandes, se doblaron en forma de 'V' o 'W', ajustándolos al tamaño del pliego del herbario (42*28 cm). El material se organiza para mostrar la mayor cantidad de detalles.

En caso de hojas largas (helechos), se toma una sección apical, una media y una basal. En las notas de campo se anota el largo total de las hojas, el largo del peciolo, el número y disposición de las pinnas, que son los segmentos que comprenden la lámina en una hoja compuesta. Con cada una de las secciones se prepara una muestra (el mismo número de colección, esto es, el número que identifica cada muestra recolectada).

En campo, las muestras se introducen en hojas de papel periódico doblado por la mitad. Este papel absorberá la humedad de las muestras, permitiendo un secado incipiente, sin que ocurra deterioro por causa de hongos. Para incrementar la conservación del material en las jornadas de campo, o para permitir un secado suave, que en muchas ocasiones conserva parte de las coloraciones de campo, pueden alternarse almohadillas, papeles absorbentes o papel periódico, entre las diferentes muestras, los cuales deben ser cambiados en los días sucesivos, tantas veces como sea necesario, hasta comprobar que las plantas estén totalmente secas.

Las hojas de las plantas se acomodan de tal forma que unas queden visibles por el haz y otras por el envés. Porciones adicionales que hayan sido recolectadas o piezas que caigan de la muestra, serán introducidas en sobres de papel, marcados con el debido número de recolección (el mismo número de la muestra).

10.1.2. DESCRIPCIÓN Y TOMA DE DATOS DE CAMPO

En la libreta de campo se registró la información en dónde se realizó la recolecta de especímenes (localidad, altitud, hábitat, fecha, etc.). Se inicia página de la libreta cuando se cambie de día de recolección o de localidad. Con la información registrada se procedió a elaborar las etiquetas respectivas (una para casa exsicado). Cada muestra se etiquetó con todos los datos que permitirán la identificación taxonómica y conocer la procedencia

y el estado fenológico, es decir la periodicidad de los fenómenos biológicos, al momento de la recolección. La información anotada en la libreta debe coincidir con el número de campo que lleva la muestra.

La información registrada en campo fue:

- Fecha de recolección: Incluye día, mes y año, sin emplear abreviaturas.
- Localidad: Lugar en el que es recolectado el material, siguiendo una secuencia jerárquica (país departamento, municipio, corregimiento, vereda, finca y otros aspectos que orienten sobre la manera de llegar al lugar). Es conveniente anotar la altitud y las coordenadas geográficas.
- Recolectores: Personas que hacen la recolección en campo.
- Número de colección: Consta de dos elementos. El primero está dado por las iniciales de los nombres y los apellidos de la persona que dentro del grupo asumió la responsabilidad y numeración de esa jornada de recolecta. La segunda parte es el número consecutivo que se adjudicará al espécimen recolectado. Este número es anotado en la libreta de campo y en el periódico.
- Familia: Nombre de la familia botánica a la cual pertenece el espécimen.
- Nombre científico: En caso de conocerse se anota.
- Nombre común: Es el dado a la especie en el lugar de la recolecta. Este varía dependiendo de la región geográfica.
- Características de la planta: Se registran las características de la planta que pueden perderse durante el procesamiento de la muestra, tales como el hábito de crecimiento, exudados, olores, colores, piezas florales. Para la descripción se usó el siguiente orden, separando los diferentes apartados con punto y coma: hábito de crecimiento; savia; tallo; hojas; sépalos; pétalos; estambres; fruto; semillas. Las características que no se pierdan no se anotaron.
- Características ecológicas: Se registran aspectos relacionados con el paisaje, así como el hábitat de la especie, indicando en lo posible, las características del sustrato, tipo de suelo, altitud, orientación, comunidad vegetal donde se desarrolla el taxón y especies con las que convive. Esta información se registró en el mismo apartado de la localidad.

Finalmente, esta descripción fue sintetizada en una etiqueta de aproximadamente 8*12 cm, que se fijó al exsiccado.

10.1.3. RECOLECCIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS DE LAS ESPECIES DE COMUNIDADES ARBÓREAS

La muestra seleccionada se recolecta información cualitativa como color, frutos, flores, corteza, altura, entre otras características; el daño es una de esas variables [1]. La altura se captura tanto total como la que va desde primer verticilo a la primera bifurcación de una rama gruesa en metros [1].

10.1.4. SECADO DE LAS MUESTRAS DE HERBARIO

El material recolectado se transfirió a prensas metálicas para ser introducidas en un horno para el secado del material. Para ello, cada una de las muestras de herbario, prensadas con el papel periódico, se colocaron entre dos láminas de cartón que absorberán la humedad de sale de las muestras. Estas, a su vez, se disponen entre dos láminas corrugadas de aluminio, que permiten el flujo de calor hacia las muestras y la salida de humedad por las ondulaciones. El material a secar se introdujo en prensas metálicas amarradas fuertemente, se sometió a un secado en horno a unos 70°C, por un tiempo de 2 días.

10.1.5. DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIES DE LA COMUNIDADES ARBÓREAS MUESTREADAS

La clasificación de las muestras surge con la observación de las mismas y los datos anotados en campo con el conocimiento de las formaciones vegetales de Colombia [29], donde una de ellas es la selva andina, descrita como una faja que va de los 2.400 m y a los 3.800 m.s.n.m., con temperatura media entre los 15° hasta los 6°C y una precipitación estimada entre 900 y 1.000 mm anuales.

Para encontrar la familia botánica de la vegetación a clasificar se da uso de la clave dendrológica, de la búsqueda en la colección del herbario Luis Sigifredo Espinal Tascón de la Universidad del Valle y del apoyo y acompañamiento por parte de los funcionarios para la identificación del material, en donde se vale de características del tronco, hojas, formas etc.

10.2. CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES HIPERESPECTRALES:

10.2.1. ADQUISICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES

La imagen de satélite utilizada en este trabajo es adquirida a partir del sensor EO-1 Satélite de Hyperion. Se trata del primer sensor espacial hiperespectral para estudios de observación de la Tierra. Está diseñado de tal manera que gira alrededor de la Tierra en una órbita sincronizada con el sol (polar) a una altitud de 705 km. El Hyperion es un escáner con una alta resolución espectral. Los datos de reflectancia espectral se registran en 242 bandas de ondas que abarcaban un rango espectral de 400 a 2500 nm, a una resolución espectral de 10 nm con precisión radiométrica de 12 bits y resolución espacial es de 30 m [26].

Tabla 1 - Información de la imagen hiperespectral de la zona de estudio.

Imagen hiperespectral			
Nombre	Fecha	No Bandas	Resolución
EO1H0090562015358110PF	2015/12/25	242	30m

10.2.2. PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

El pre-procesamiento de la imagen hiperespectral comprende un paso esencial en el desarrollo del proyecto para asegurar que los valores y variables que se extraigan del mismo sean lo más fiel posible a la realidad; esto se consigue aplicando diferentes procesos y ecuaciones matemáticas que reduzcan o eliminen el error por diferentes fuentes como atmosférico, radiométrico, geométrico, entre otros.

10.2.2.1. FILTRADO DE BANDAS SIN INFORMACIÓN DE LAS IMÁGENES HIPERESPECTRALES

El sensor Hyperion VNIR tiene 70 bandas, y el SWIR tiene 172 bandas que proporcionan 242 bandas potenciales. Varias bandas no se iluminaron intencionadamente y otras (principalmente en la región de solapamiento entre los dos espectrómetros) correspondieron a áreas de baja sensibilidad de los materiales del espectrómetro [30]. Debido a esto, solo se han proporcionado 198 bandas en los productos de nivel 1B1 de Hyperion; las bandas no utilizadas (1 a 7, 58 a 76 y 225 a 242) se establecen en valores cero.

Por medio de la herramienta Spectral Subset del software ENVI, se seleccionan sólo las bandas que contienen información, se eliminan las bandas 1-7, 58-76 y mayores o igual a 225 porque no contienen información y las bandas 121-126, 167-180 y 222-224 porque tienen ruido.

Este proceso se realiza con el fin de reducir la complejidad computacional, eliminando píxeles anormales y bandas que no sean de utilidad para el desarrollo del proyecto, dejando un producto de 175 bandas para la calibración radiométrica.

10.2.2.2. CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

Las imágenes hiperespectrales cuentan con un inmenso número de bandas que permite extraer gran cantidad de información de la superficie, su captura puede ser bajo plataformas de satélite, lo que ocasiona una afectación en la reflectancia o emitancia debido a la atmósfera en aproximadamente la mitad de la región espectral de 0.4 - 2.5, en el trayecto, sol-superficie-sensor [31].

El proceso de calibración radiométrica se realiza a partir de la herramienta de ENVI que permite ingresar la imagen en valores digitales y aplicando la ecuación (1) devuelve un producto en valores de radiancia.

10.2.2.3. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Lo que diferencia las imágenes hiperespectrales de otras imágenes son las firmas espectrales debido a la continuidad entre bandas; dicha firma y su estudio arroja información sobre cualquier objeto entre la luz visible y el infrarrojo [32]. Por tanto evidencian la importancia de la reducción del efecto atmosférico para las imágenes hiperespectrales evaluando dos modelos de QUAC (Quick Atmospheric Correction) y FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) [33], encontrando que este último era mejor en el propósito.

La herramienta FLAASH en primera instancia corrige el rango de luz visible por medio del rango del infrarrojo. En segunda instancia incorpora los métodos de transferencia de radiación de MODTRAN4 [34], [35].

EL algoritmo FLAASH requiere como imagen de entrada la radiancia con la calibración previa, información que se encuentra en el metadato como: fecha de vuelo, hora de inicio, hora en GMT, centro de escena, altitud del sensor y elevación del terreno.

EL algoritmo FLAASH se aplica a la imagen de radiancia por medio de la herramienta de ENVI que inicia a partir de una ecuación estándar para la radiancia espectral en un píxel, L , que se aplica a la gama de la longitud de onda, ecuación (2).

Las variables utilizadas en la ecuación dependen de la cantidad en la columna de vapor de agua y están determinadas por cálculos que utiliza MODTRAN a partir de los ángulos de visión, el ángulo de elevación solar, modelo atmosférico, tipo de aerosol y rango visible. Este analiza la longitud de onda de las bandas de la imagen para recuperar una cantidad estimada para cada píxel. Específicamente los promedios de radiancia son reunidos en dos bandas: un conjunto de absorción centrado en una banda de agua y un conjunto de bandas de referencia, tomado de las afueras de la banda.

Después se lleva a cabo la recuperación de agua y se aplica la ecuación (3) para la determinación de la reflectancia de la superficie.

Para obtener resultados precisos, los píxeles que contienen nubes se enmascaran antes de promediar. Los píxeles nublados se encuentran utilizando una combinación de brillo, relación de bandas y las pruebas de vapor de agua [36].

El modelo FLAASH incluye un método para recuperar una cantidad estimada de aerosol de los píxeles oscuros de la tierra seleccionados en la escena. El método se basa en una relación casi fija entre la reflectancia de los píxeles a 660 nm y 2100 nm. FLAASH recupera la cantidad de aerosol iterando las ecuaciones (2) y (3) a través de una serie de bandas visibles. Para cada rango visible, recupera los 660 nm y 2100 nm de reflectancia de la escena de la media de los píxeles oscuros, y se interpola la mejor estimación del rango visible, haciendo

coincidir la escala con la escala media de ~ 0.45 . Utilizando esta estimación de rango visible, FLAASH realiza un segundo y último bucle de cálculo MODTRAN sobre el agua [37].

De la aplicación del algoritmo FLAASH se obtiene como resultado final una imagen corregida atmosféricamente, en valores de reflectancia.

10.2.2.4. REDUCCIÓN DE DIMENSIONALIDAD

La técnica conocida como Análisis de Componentes Principales (ACP) permite sintetizar la información contenida en las bandas originales, creando unas nuevas bandas sin perder una parte significativa de esa información [38].

El procedimiento más conocido de reducción de la dimensionalidad (reducción de número de bandas) de imágenes se denomina Fracción de Mínimo Ruido (MNF, “Minimum Noise Fraction”) y consiste en aplicar dos ACP consecutivos. El primero, basado sobre una matriz de covarianza del ruido estimado (ecuación 9), permite eliminar la redundancia y re-escalar el ruido de los datos. De este primer paso se obtiene como resultado datos transformados en una nueva escala. El segundo, es un ACP convencional de los datos ya depurados que crea varias bandas nuevas con la mayoría de la información relevante. El ruido se estima a partir de los componentes marginales de los “auto valores” de las nuevas bandas y sus imágenes asociadas, centrando el análisis en aquellos que retienen la mayor parte de la información original. Entonces, el espacio de datos resultantes puede ser dividido en dos partes: una asociada con altos valores de “auto valores” y sus coherentes imágenes correspondientes, y otra complementaria con bajos “auto valores” e imágenes dominadas por ruido [39].

El proceso de las aplicaciones de ACP se realizó mediante la herramienta de Componentes Principales del software ERDAS, generando las matrices de varianza y covarianza, que permiten aplicar el procedimiento de Fracción de Mínimo Ruido por medio del software ENVI. Se recomienda un valor superior a 2,0 de “auto valores” para delimitar el ruido [40].

Por consiguiente, utilizando sólo las porciones coherentes, el ruido quedará separado de los datos mejorando así los resultados del procesamiento espectral [41].

10.2.3. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA, MAPEO DE ÁNGULO ESPECTRAL

10.2.3.1. ENTRENAMIENTO

Los datos de entrenamiento se obtienen con una interpretación visual de la imagen hiperespectral para designar las diferentes comunidades de especies forestales que existen en la zona de estudio.

Cuando se trata de clasificación de especies forestal, el píxel debe contener únicamente la firma espectral del dosel de la especie de interés con una resolución geométrica tal que se cumpla este requisito [19], ya que la imagen hiperespectral disponible se encuentra a 30m de resolución, no se identifica una especie forestal, sino la especie de una comunidad forestal predominante.

10.2.3.2. CLASIFICACIÓN

El método de clasificación, Mapeo de Angulo Espectral, parte de la hipótesis de que cada píxel corresponde únicamente a una categoría de referencia; para determinar a cuál pertenece cada píxel, calcula la similitud entre las firmas espectrales que están en función del número de bandas, midiendo el ángulo entre ellas [24]; un ángulo más pequeño indica mayor similitud, matemáticamente se expresa en la ecuación (27) y se efectúa en el software MultiSpec.

10.2.3.3. VALIDACIÓN

Una vez clasificadas las especies se procede a comprobar la eficacia de la clasificación [25], mediante una matriz de confusión y los índices de exactitud global y Kappa, con el uso de las ecuaciones (28) y (29), respectivamente.

En la captura de información in situ se toman los datos para la validación y adicionalmente se escoge un grupo de puntos que oscila entre 30 y 190 por clase, para efectuar los procesos mencionados anteriormente.

10.3. CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES:

10.3.1.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Las imágenes satelitales Sentinel-2, cuentan con trece bandas multiespectrales en el espectro visible, en el infrarrojo cercano e infrarrojos de onda corta además del espectro electromagnético. Las imágenes cuentan con una resolución espacial de 10, 20 y 60 m y fueron obtenidas gratuitamente por medio del portal web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Al ser imágenes ópticas, las nubes son la condición principal para elegir una u otra imagen, bajo ese criterio se escogió las dos imágenes siguientes:

Tabla 2 - Datos de imágenes multiespectrales Sentinel-2.

Imágenes multiespectrales Sentinel-2			
Nombre	Fecha	No Bandas	Resolución
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160121T020055_R025_V20160120T153242_20160120T153242.SAFE	2016/01/21	13	10, 20, 30

S2A_MSIL1C_20170901T152641_N0205_R025_T18NVL_20 170901T152638.SAFE	2017/09/01	13	10, 20, 30
---	------------	----	------------

10.3.1.2. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES SENTINEL-2

Para utilizar las imágenes de satélite para una clasificación de cobertura, estas deben estar en términos de reflectancia, sin embargo, un cálculo simple de estos valores incluiría los errores atmosféricos presentes en todas las imágenes ópticas; por lo anterior la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en ingles), creó una herramienta para corregir atmosféricamente imágenes Sentinel-2A, llamada Sen2Cor.

Los pasos principales para el procesamiento Sen2Cor son la detección de nubes y la clasificación de la imagen, seguido de la recuperación del Grosor Óptico de Aerosol (AOT) y el contenido de Vapor de Agua (WV) de la imagen sin corrección atmosférica [14]; el resultado final de esos pasos será entonces el paso de la reflectancia del tope de la atmosfera a la reflectancia de la superficie en estudio.

Internamente para la adquisición de los parámetros atmosféricos del modelo, Sen2Cor utiliza el algoritmo APDA (Absorción Diferencial Pre-correctada Atmosférica) para obtener el vapor de agua de la imagen sin corregir, relacionando las bandas 8A y 9; y el método de recuperación de pixeles de Vegetación oscura densa (DDV) de Kaufmann para obtener el espesor óptico en aerosol (AOT).

Más ampliamente el algoritmo APDA está conformado por dos partes esenciales, la primera es la pre-corrección atmosférica y la segunda las técnicas de absorción diferencial [15]. Para comprender esa primera parte se debe tener claro que la radiancia a nivel del sensor, está en función de la radiancia reflejada en el suelo y la radiancia atmosférica, como está expresada en la ecuación (4). Se deben recuperar los errores por contenidos de vapor de agua ya que el segundo término de la radiancia a nivel del sensor, compensa la refracción del suelo al primer término. Para obtener esos datos de vapor de agua de una mejor manera se efectúa una pre-corrección atmosférica lo que asegura entonces que el método APDA, solo se ve influenciado por el vapor de agua y no por la reflectancia del suelo.

En la segunda parte, las técnicas de absorción diferencial permiten determinar los contenidos de gas por medio de una relación entre canales de absorción y de proximidad; con canales de referencia a ambos lados de la banda de absorción se puede obtener la pendiente de la reflectancia, dicha relación se denomina "relación de banda interpolada continua" (CIBR) como se evidencia en la ecuación (5). El ruido del sensor no permite una medición precisa de los contenidos de gases, por lo que se aumenta el número de canales de referencia seleccionados y se relacionan mediante una regresión lineal (LIRR) como se puede observar en las ecuaciones (6) y (7), [15].

Cuando al modelo se le resta la radiancia atmosférica no reflejada en el suelo a la radiancia del sensor, es decir, la pre-corrección atmosférica, ese se convierte en APDA.

De manera práctica, la herramienta se instala en el software SNAP, de la ESA, y se ejecuta seleccionando la imagen a corregir y la resolución a la que se efectuará la corrección atmosférica. El resultado incluye las bandas a las tres resoluciones corregidas, la clasificación interna que realiza, Indicadores de calidad para probabilidades de nubes y nieve, recuperación del Grosor Óptico de Aerosol (AOT) y el contenido de Vapor de Agua (WV).

10.3.1.3. REMUESTREO Y CORTE DE LA IMAGEN

Con el fin de obtener una imagen con una resolución de 10m y 10 bandas espectrales de la zona de estudio, se utiliza la herramienta de “resampling” de SNAP, en el que se tienen en cuenta 16 vecinos cercanos del pixel a evaluar; para encontrar el nuevo valor de un punto (x, y) se debe aplicar la ecuación (13), donde los 16 coeficientes se calculan con las 16 ecuaciones que surgen de los 16 vecinos de cada punto. Este método conserva mucho mejor los detalles finos en comparación con el modelo bilineal [17].

Posteriormente se efectúa un recorte de la zona de estudio y una selección de las bandas que se utilizarán en la clasificación. El resultado final será entonces un raster con 10 bandas y a la resolución escogida de 10m del recorte efectuado.

10.3.1.4. DETERMINACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRENAMIENTO

Una vez se cuenta con las imágenes de la zona de estudio en valores de reflectancia, se inicia el proceso de clasificación preliminar de las comunidades de especies arbóreas y de los demás elementos que se encuentran en la zona.

Posteriormente se deben seleccionar las muestras de entrenamiento por medio de “ROI”, los cuales están conformados por uno o más píxeles de la categoría específica determinada por el usuario, cabe mencionar también que estas son firmas espectrales, es decir que contienen los valores de todas las bandas que la imagen posee.

10.3.1.5. CLASIFICACIÓN

A partir de las muestras de entrenamiento obtenidas en el paso anterior, se realiza la clasificación, en este caso usando el método de Mapeo de Angulo Espectral, que permite determinar a cuál categoría pertenece cada pixel, calcula la similitud entre las firmas espectrales, quienes están en función del número de bandas, midiendo el ángulo entre ellas, un ángulo más pequeño indica mayor similitud, como se expresa en la ecuación (27) [24].

El resultado es la caracterización de los distintos elementos presentes en la zona de estudio en categorías como arbustales, bosque, nieve, nubes, sombra, suelo y demás; para ambas imágenes de satélite. Ya que la imagen de enero de 2016 posee menos nubosidad que la de septiembre 2017, la clasificación de la primera fue complementada con el de la segunda.

10.3.1.5.1. VALIDACIÓN

Se calculó la matriz de confusión y se comprobó la eficacia de la clasificación mediante los índices de exactitud global y Kappa, con el uso de las ecuaciones (28) y (29) [25].

En la captura de información in situ se toman los datos para la validación y adicionalmente se escoge un grupo de puntos que oscila entre 30 y 170 por clase, para efectuar los procesos mencionados anteriormente.

10.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODIVERSIDAD Y VARIABLES DE INTERÉS

Se determinan las siguientes variables a partir de los datos multiespectrales y del MDE de la zona, para complementar los datos necesarios para la caracterización de bosque y por tanto del inventario forestal.

10.4.1. SISTEMA DE DRENAJE

10.4.1.1. DESCARGA DEL MDE

La NASA proporciona una serie de MDE de todo el mundo a diversas resoluciones, esta plataforma permite seleccionar uno en función de la zona y la fecha. En la Tabla 3 se encuentra la información asociada al MDE seleccionado.

Tabla 3 - Información sobre el DEM de la zona de estudio.

Modelo digital de elevación		
Nombre	Fecha	Resolución
AP_27373_FBS_F3520_RT1	2011/03/15	12,5m

10.4.1.2. DETERMINACIÓN DE LAS DIRECCIONES DE FLUJO

Los modelos digitales de elevación dan lugar a redes de drenaje, a partir de la implementación del algoritmo escogiendo el pixel donde fluirá la red de drenaje como el que tenga menor elevación [9].

10.4.1.3. DETERMINACIÓN DE LAS ACUMULACIONES DE FLUJO

Las acumulaciones de flujo dependen de los valores de las direcciones de flujo, a cada celda evaluada se le asigna el número de celdas que fluyen hacia ella, una celda sin acumulación usualmente son parte aguas [20]. Al raster resultante de dicho proceso se le somete a un condicional, si las acumulaciones sobrepasan un umbral de 1000 harán parte de la red de drenaje tomando el valor de “1”, en caso contrario “0”; cabe mencionar que dicho umbral se escoge como el que mejor representa la red de drenaje de la zona de estudio.

10.4.1.4. PASO DE RASTER DE ACUMULACIONES DENTRO DEL UMBRAL A RED DE DRENAJE VECTORIAL

Una vez con el raster de acumulaciones de flujo que cumplen el umbral de ser mayor que 1000, se procede a convertir en un elemento vectorial, el resultado final es entonces la red de drenaje en formato shapefile tipo línea.

10.4.2. MAPA PENDIENTES Y CURVAS DE NIVEL

La pendiente se define en grados como la diferencia de altura sobre la distancia horizontal entre dos puntos [21]; en el caso de convertir un MDE en tipo raster a un mapa de pendientes, el valor que toma cada pixel depende de los ocho pixeles vecinos a él por la técnica de máximo promedio, esto se expresa en la ecuación (18). Gracias al método de máximo promedio, se utilizan los valores de las ocho celdas vecinas a cada pixel evaluado y los valores que toman se derivan de las ecuaciones (19) y (20).

Existen dos formas de expresar la pendiente, en grados y en porcentaje y matemáticamente se pueden observar en las ecuaciones (21) y (22) [22]. Por lo anterior se deduce entonces que un mapa de pendientes en porcentaje está regido por la ecuación (23).

Para comenzar a delinear curvas de nivel, el MDE se toma como una matriz de cuadrícula de elevación y se debe designar el punto de inicio de cada una de ellas, cabe mencionar que este se encuentra entonces entre dos puntos de la grilla, uno menor y otro mayor [23]. Los autores plantean bajo unos supuestos, los posibles candidatos a puntos de inicio; la condición matemática para confirmar si existe un punto con elevación Z , que pertenezca a un intervalo $[,]$ está en la ecuación (24) para las condiciones (25) y (26).

La extracción de las curvas de nivel surge con la implementación del método “árbol de intervalos” [23], este árbol está conformado por un borde horizontal con nodos, los cuales corresponden a intervalos de elevación de la grilla y donde el primer nodo de izquierda a derecha es menor que el segundo. Bajo este mecanismo se evaluarán los intervalos candidatos de las curvas de nivel.

10.4.3. GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA

Esta información se extrae del plan de manejo 2017-2022 del Parque Nacional Natural Los Nevados, del que el Paramillo de Santa Rosa hace parte.

10.4.4. CLIMA

10.4.4.1. TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

La temperatura superficial de la tierra es un variable muy importante para entender las dinámicas tanto a nivel local o global y surge de las bandas térmicas (TIR) [34].

10.4.4.1.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Las imágenes satelitales Landsat 8 OLI, cuentan con nueve bandas multiespectrales que cubren el espectro desde los 0.433 μm a los 1.390 μm . Las imágenes cuentan con una resolución espacial de 30 m y fueron obtenidas gratuitamente por medio del portal web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>). La información básica de la imagen utilizada en el proyecto se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4 - Información de las imágenes Landsat-8.

Imagen multiespectral Landsat-8			
Nombre	Fecha	No Bandas	Resolución
LC08_L1TP_009057_20141226_20170415_01_T1	2014/12/26	11	30

10.4.4.1.2. PRE PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN MULTIESPECTRAL LANDSAT 8 OLI (CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA)

Inicialmente se realizó la corrección radiométrica de cada una de las imágenes utilizadas, este proceso consiste en la conversión de los números digitales de la imagen a los valores de radiancia a partir de la ecuación (1); esta función está aplicada en la herramienta de *Calibración radiométrica* del software ENVI 5.3. Al ingresar la imagen en valores digitales, la procesa y devuelve la imagen en valores de radiancia.

10.4.4.1.3. CÁLCULO DE TEMPERATURA DE BRILLO

Luego de tener los valores de radiancia se calcula la temperatura de brillo por medio de la ecuación (14). Las constantes K1 y K2 se obtienen del metadato de la imagen y como resultado se genera una imagen con valores de temperatura de brillo en grados Kelvin, para hacer el paso a grados centígrados, a este resultado se le resta el valor de 272,15.

10.4.4.1.4. CÁLCULO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

De la temperatura de brillo se deriva la temperatura superficial de la tierra que está dada por la ecuación (15), esta se compone de la temperatura de brillo, la longitud de onda de la banda, la constante de Planck y ϵ la emisividad.

ϵ a su vez esta expresada por la ecuación $\epsilon_{10} = 0.973 - 0.047P_V$ y $\epsilon_{11} = 0.984 - 0.026P_V$, para las bandas térmicas 10 y 11 respectivamente según (Yu, Guo y Wu, 2014), donde P_V es la fracción de vegetación y está dada por la ecuación (16).

Para la aplicación de esta ecuación se debe calcular $NDVI$ a partir de la ecuación (17).

El resultado de la temperatura superficial de la tierra se evidencia en la Figura 24.

10.4.4.2. PRECIPITACIÓN

Esta información se extrae del plan de manejo 2017-2022 del Parque Nacional Natural Los Nevados, del que el Paramillo de Santa Rosa hace parte.

11. RESULTADOS

11.1. ADQUISICIÓN DE DATOS “IN SITU” O INVENTARIO EN CAMPO

La recolección se produjo en los alrededores de una finca ubicada en el paramillo de Santa Rosa, de coordenadas (Latitud: 4°45'5" N y Longitud: 75°29'24" O, elevación: 3800 m.s.n.m.); para llegar a tal ubicación se debe efectuar un largo recorrido, en automóvil hasta el PNN Los Nevados, más exactamente laguna de Potosí, dos horas y media en mula como medio de transporte a la laguna de Otún y desde este punto a la zona de recolección, cuatro horas y media, igualmente en mula.

Una vez en la zona de recolección se realiza un reconocimiento de las especies representativas que se evidencian en un área de 3 ha aproximadamente con ayuda de las imágenes satelitales de la zona y teniendo en cuenta el tamaño del pixel, todo esto, valiéndose de un GPS de mano y de la recolección y descripción de las muestras. Se recolectaron 5 muestras de especímenes arbustivos y un punto adicional de pastizal (ver la Tabla 5); cabe resaltar que para la recolección de datos in-situ para el reconocimiento de todas las especies representativas de la zona se requiere un número mayor de días de exploración con una comisión mayor debido a las dificultades que presenta dicho ecosistema.



Figura 4 - Recorrido en mula por el PNN Los Nevados.



Figura 5 - Trabajo en campo.



Figura 6 - Espécimen arbustivo representativo.

Tabla 5 - Datos recolectados en campo.

ID	Latitud	Longitud	Elevación	Descripción
1	4,7509766	-75,4905991	3759,731	Pasto
2	4,75105736	-75,4905501	3761,154	<i>Hypericum juniperium</i>
3	4,75124099	-75,4908492	3765,273	<i>Hesperomeles ferrugina</i>

4	4,75177996	-75,4908028	3771,834	<i>Espeletia hartwegiana</i>
5	4,75163224	-75,4907235	3770,268	<i>G. Diplostephium</i>
6	4,75087202	-75,4910451	3760,911	<i>Gynoxys tolimensis</i>

11.2. CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES HIPERESPECTRAL

11.2.1. PROCESAMIENTO Y CORTE DE LA IMAGEN HIPERESPECTRAL HYPERION

En la Figura 7, se presenta el recorte de la imagen de satélite en valores de reflectancia sin error atmosférico; se evidencia la zonal nival del paramillo de Santa Rosa, el ecosistema de páramo propiamente dicho, el sub-páramo y la transición entre ellos. En la imagen también se evidencia la presencia de sombras debido a la topografía de la zona y el ángulo de toma del sensor Hyperion.

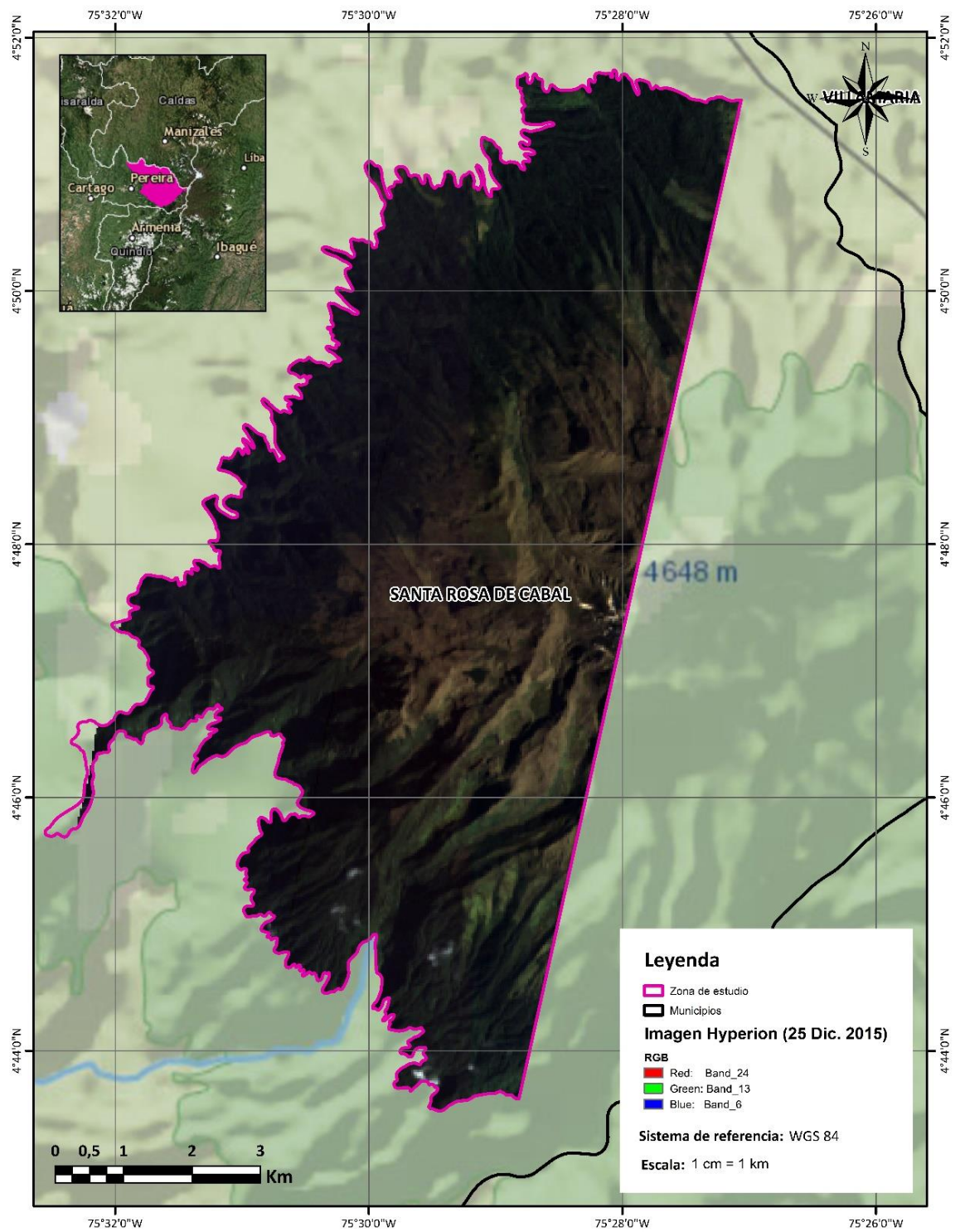


Figura 7 - Imagen hiperspectral corregida de la zona de estudio.

En la Figura 8 se observa la firma espectral de la imagen hiperespectral correspondiente a una cobertura de bosque (latitud: -75.5, longitud: 4.8) conformada por 175 bandas, estas se encuentran distribuidas en 32 bandas en el espectro visible (425nm – 742nm), 63 en el infrarrojo de onda corta (752nm – 1346nm) y 80 en el infrarrojo de onda media (1416nm – 2365nm). Esta firma evidencia en comportamiento de la cobertura de bosque en las diferentes longitudes de onda, según lo anterior esta tiende entonces a tener los valores más bajos en el rango del azul e incrementarse para el verde y el rojo, los valores más altos de reflectancia son para el infrarrojo de onda corta y comienzan a disminuir para el de onda media.

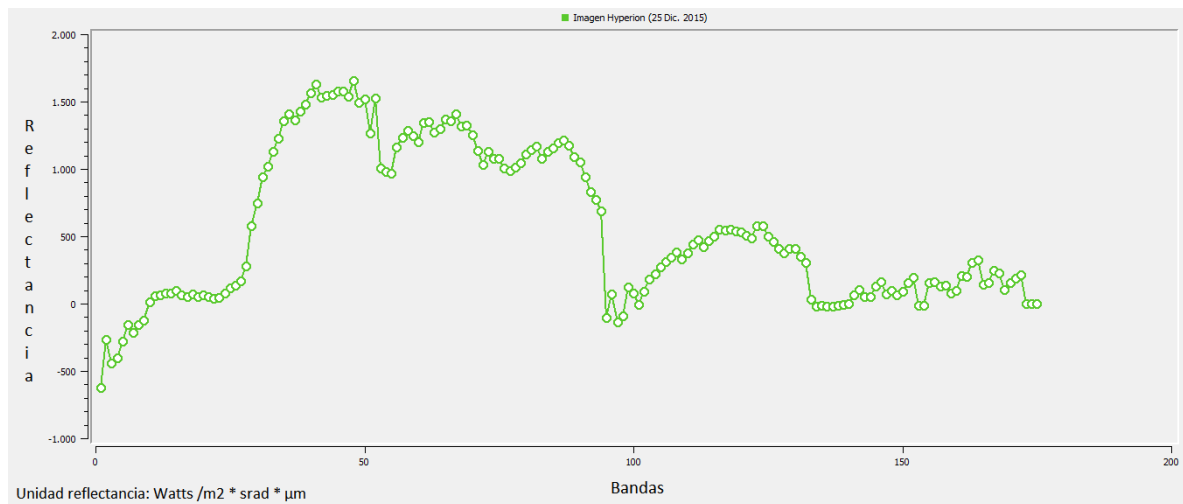


Figura 8 - Ejemplificación de firma espectral del bosque (175 bandas).

• CLASIFICACIÓN

La clasificación resultante de implementar el método de Mapeo de Ángulo Espectral se evidencia en la Figura 6, donde se representan por colores distintivos 13 clases de la zona de estudio y cabe mencionar que la resolución espacial de 30m limita en cierta medida la designación de clases; se observa entonces la clara separación existente entre las coberturas que pertenecen al páramo propiamente dicho y el sub-páramo. La primera posee vegetación arbustiva muy bajas o pastizales, agrupados de forma no muy densa, en donde predomina el pasto paramuno y en donde hace presencia una sección de zona nival; la segunda está conformada por arbustales bajos, medianos y altos y árboles en sí, sin embargo, la imagen hiperespectral debido al ángulo de captura presenta secciones con presencia de sombras por la topografía.

Por otro lado, a algunas clases se les asignó el nombre de la especie predominante por medio de los datos recolectados en campo.

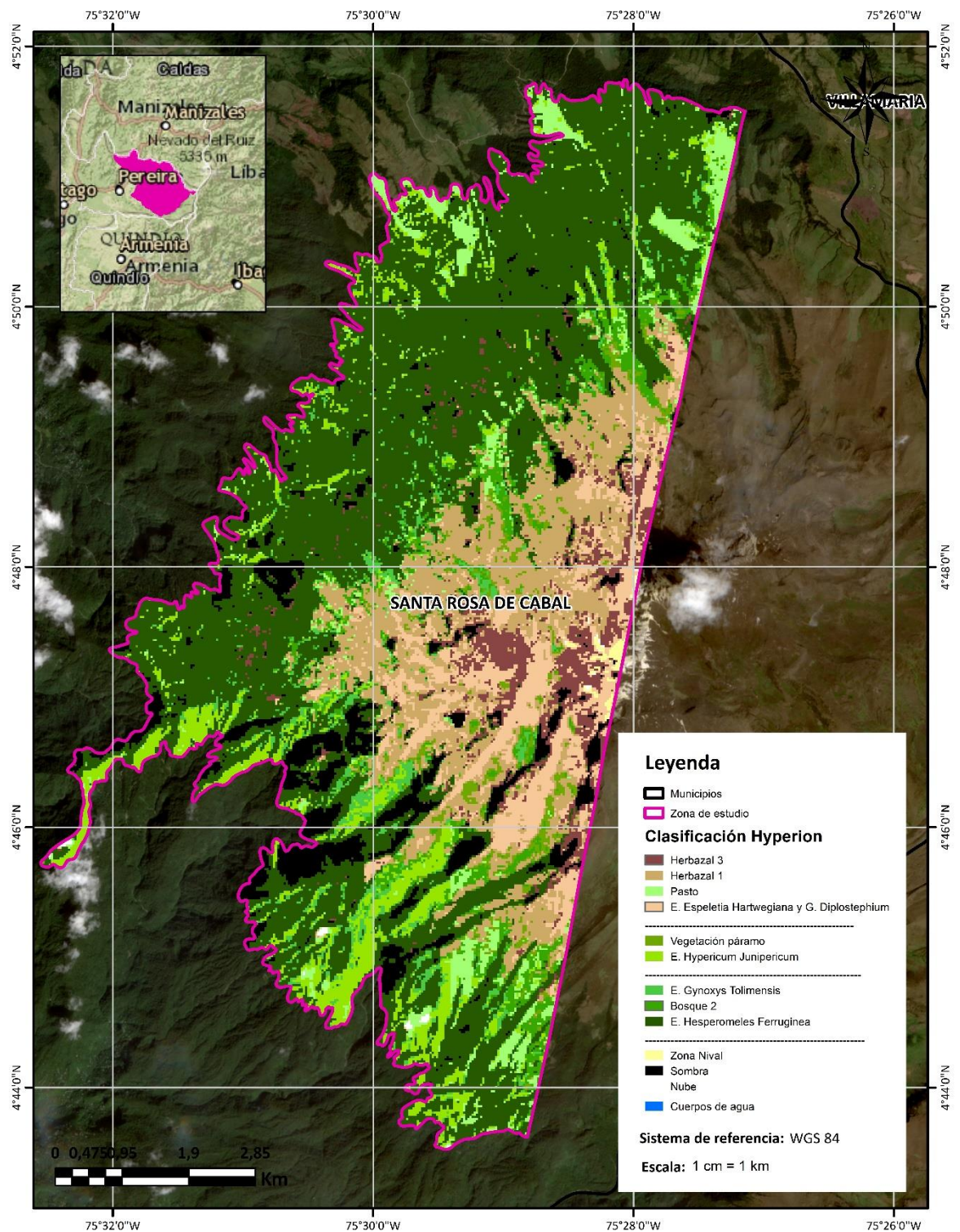


Figura 9 - Clasificación de la imagen hiperespectral.

En la Tabla 6 se relacionan las clases resultantes, el área en hectáreas y el porcentaje que estas representan en la zona de estudio; se encuentran en mayor proporción, la clase con la especie representativa *Hesperomeles ferruginea* y herbazal 1 que puede ser llamado también pasto paramuno.

Tabla 6 - Áreas y porcentajes por clase, en la clasificación de la imagen hiperespectral.

Nombre de la clase	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cuerpos de agua	3,6	0,052
Nube	7,5	0,106
Zona Nival	18,2	0,258
Vegetación páramo	151,4	2,152
Gynoxys tolimensis	196,0	2,785
Bosque 2	291,1	4,136
Herbazal 3	316,3	4,495
Pasto	323,5	4,596
Sombra	434,9	6,179
Espeletia hartwegiana y Diplostephium	447,1	6,353
Hypericum juniperium	483,8	6,875
Herbazal 1	1007,7	14,319
Hesperomeles ferruginea	3356,5	47,694
TOTAL	7037,65	100

○ VALIDACIÓN

Para evaluar la exactitud de la clasificación producida con imágenes hiperespectrales se implementa la matriz de confusión, el resultado se observa en la Tabla 7 donde la diagonal indica el número de casos clasificados correctamente por cada clase y los valores fuera de ella son los casos erróneamente clasificados; de ella se logra deducir la tendencia de algunas clases a ser confundidas en la clasificación, como en el caso de Herbazal 1 y *Espeletia hartwegiana* y *Diplostephium* o *Hesperomeles ferruginea* con la sombra, etc. O incluso la exactitud del clasificador y las muestras en las clases de zona Nival e *Hypericum juniperium*.

Tabla 7 – Matriz de confusión de la clasificación de la imagen hiperespectral.

Nombre de la clase	ZN	H3	EH/ D	H1	GT	VP	B2	HJ	P	HF	S	N	Verdad del terreno
Zona Nival (ZN)	36	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39
Herbazal 3 (H3)	0	52	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	56
Espeletia hartwegiana y Diplostephium (EH/ D)	1	2	148	4	0	0	0	0	0	0	0	1	156
Herbazal 1 (H1)	0	3	32	66	0	4	2	0	3	0	0	1	111
Gynoxys tolimensis (GT)	0	0	0	4	34	0	2	3	0	2	0	0	45
Vegetación paramo (VP)	0	3	6	3	0	33	1	1	9	0	0	0	56

Bosque 2 (B2)	0	1	0	10	2	3	53	2	7	0	0	0	78
Hypericum juniperium (HJ)	0	0	1	0	10	0	0	105	5	1	0	1	123
Pasto (P)	0	0	0	3	0	0	0	0	84	1	0	10	98
Hesperomeles ferruginea (HF)	0	0	0	7	3	0	2	2	2	87	6	1	110
Sombra (S)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	57	0	80
Nube (N)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	16
TOTAL	38	61	191	97	49	40	60	113	110	117	63	29	968

En la Tabla 8 se sintetizan los porcentajes de aciertos por cada clase organizadas de menor a mayor exactitud en la clasificación. Se identifica que las categorías “Nube” y “Herbazal 1” son las más bajas y “Zona nival” y “*Hypericum juniperium*” las más altas. Los rangos de porcentajes de casos clasificados correctamente oscilan entre el 50 y el 94% aproximadamente.

Tabla 8 - Porcentaje de casos de clasificación correctos.

Nombre de la clase	Píxeles clasificados correctamente	Total de píxeles clasificados	Porcentaje clasificado correctamente (%)
Nube	15	29	51,724
Herbazal 1	66	97	68,041
Gynoxys tolimensis	34	49	69,388
Hesperomeles ferruginea	87	117	74,359
Pasto	84	110	76,363
Espeletia hartwegiana y Diplostephium	148	191	77,487
Vegetación páramo	33	40	82,500
Herbazal 3	52	61	85,246
Bosque 2	53	60	88,333
Sombra	57	63	90,476
Hypericum juniperium	105	113	92,920
Zona Nival	36	38	94,737

Los índices Global y Kappa obtenidos de la matriz de confusión se sintetizan en la Tabla 9 y corresponden a 0,795 y 0,772, respectivamente, lo que representa un alto nivel de acierto ya que el valor de mayor coincidencia es 1.

Tabla 9 - Índice de precisión de la clasificación Kappa.

Índice de clasificación correcta	
General	0,795
Kappa	0,772

11.3. CLASIFICACIÓN DE COMUNIDADES ARBÓREAS CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES

- PROCESAMIENTO, REMUESTREO Y CORTE DE LA IMAGEN MULTIESPECTRAL SENTINEL2

En la Figura 10 se presentan las imágenes multiespectrales sobre las que se evidencia claramente la zona nival del paramillo de Santa Rosa, el ecosistema de páramo propiamente dicho, el sub-paramo y la transición entre ellos.

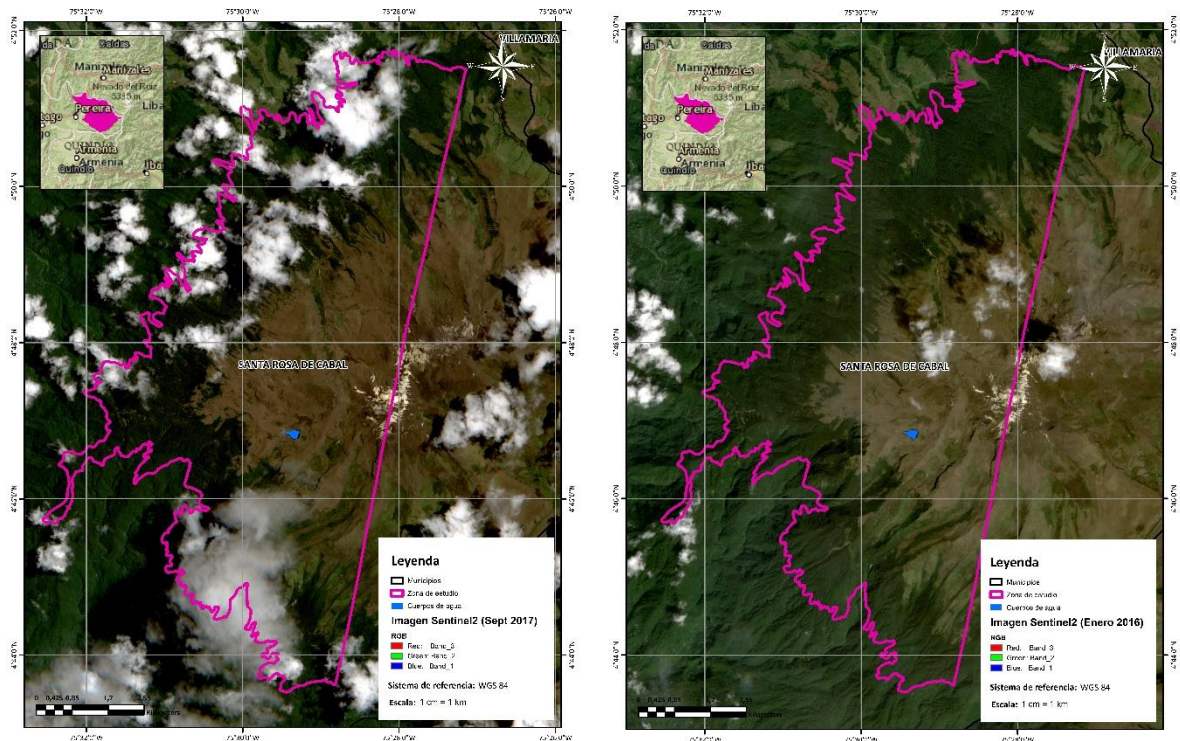


Figura 10 - Imágenes multiespectrales corregidas de la zona de estudio.

Las imágenes de la Figura 10, corresponden al satélite Sentinel-2 en combinación RGB (3, 2, 1). Estas imágenes se encuentran en valores de reflectancia sin error atmosférico. Aunque las bandas de las imágenes Sentinel-2 poseen diferentes resoluciones espaciales, estas han sido re-muestreadas a una resolución espacial de 10 m, con la que se realiza mucho más los detalles dentro de la imagen.

Tabla 10 - Longitud de onda y resolución por banda de las imágenes Sentinel-2.

Bandas	Longitud de onda central μm	Resolución (m)
Banda 1 – aerosol de costa	0.443	60
Banda 2 – azul	0.490	10
Banda 3 – verde	0.560	10
Banda 4 – rojo	0.665	10
Banda 5 – Vegetación Red Edge	0.705	20
Banda 6 – Vegetación Red Edge	0.740	20
Banda 7 – Vegetación Red Edge	0.783	20
Banda 8 – Infrarrojo cercano	0.842	10
Banda 8A – Vegetación Red Edge	0.865	20
Banda 9 - vapor de agua	0.945	60
Banda 10 – Infrarrojo de onda corta (nubes)	1.375	60
Banda 11 - Infrarrojo de onda corta	1.610	20
Banda 12 - Infrarrojo de onda corta	2.190	20

La Figura 11 permite evidenciar el comportamiento espectral de la cobertura de bosque en la imagen Sentinel-2 (latitud: -75.5, longitud: 4.8).

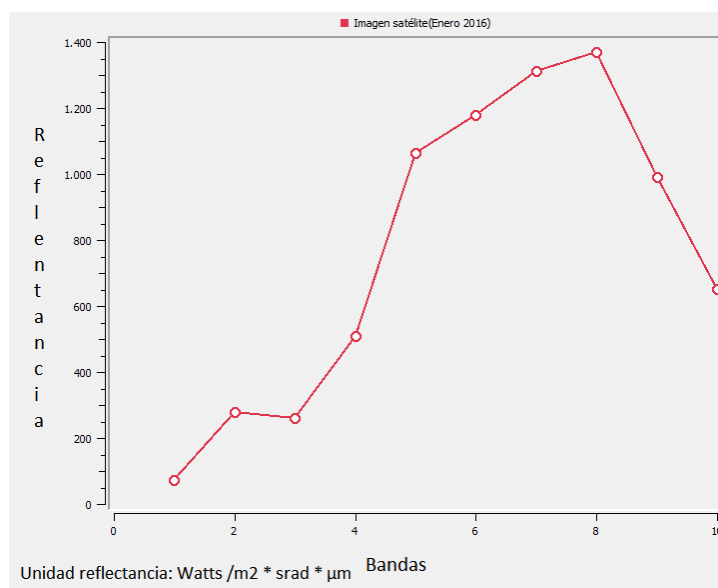


Figura 11 - Ejemplificación de firma espectral del bosque (10 bandas).

○ CLASIFICACIÓN

En la Figura 12 se presenta el resultado de la clasificación semi-automática, donde se representan 17 clases de la zona de estudio, 4 clases adicionales a la clasificación obtenida

de la imagen hiperespectral. Estas nuevas clases corresponden a las zonas de afloramiento rocosas, una clase más de herbazal y de bosque y los píxeles sin clasificar. Debido a la alta resolución espacial de la imagen multiespectral (10 m), que permitió un análisis más detallado a nivel de píxel, se realizó una asignación de clases más detallada y diferenciada una de otra.

Se obtuvo la clara diferenciación entre las coberturas predominantes de la zona de estudio, la de páramo y sub-páramo. En la zona de páramo está presente la zona nival y se diferenciaron tres clases de herbazal, estas coberturas están dadas por vegetación arbustiva baja y pastizal, agrupados de forma no muy densa, con presencia abundante de pasto paramuno y la especie *Espeletia hartwegiana* y *Diplostephium* identificada en la toma de datos en campo. En la zona de sub-páramo se identifican tres clases de bosque y las especies *Gynoxys tolimensis*, *Hesperomeles ferruginea* e *Hypericum juniperium* caracterizadas por ser arbustales bajos, medianos y altos y árboles en sí.

En la Tabla 11, se sintetiza las clases resultantes, el área en hectáreas y el porcentaje que estas representan en la zona de estudio; se encuentra en mayor proporción, la clase con la especie representativa *Hesperomeles ferruginea*.

Tabla 11 - Áreas y porcentajes por clase, en la clasificación de la imagen multiespectral.

Nombre de la clase	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cuerpos de agua	3,53	0,05
Sombra	4,4	0,06
Sin clasificar	5,3	0,07
Nube	8,7	0,12
Herbazal 2	14,4	0,20
Afloramiento rocoso	19,20	0,27
Zona nival	60,10	0,83
Herbazal 3	108,64	1,51
Bosque 2	118,47	1,65
<i>Hypericum juniperium</i>	308,35	4,28
Pasto	386,42	5,36
Herbazal 1	390,11	5,42
Vegetación páramo	427,95	5,94
<i>Gynoxys tolimensis</i>	704,57	9,78
Bosque 1	906,98	12,59
<i>Espeletia hartwegiana</i> y <i>Diplostephium</i>	1608,94	22,33
<i>Hesperomeles ferruginea</i>	2136,85	29,66
TOTAL	7203,95	100

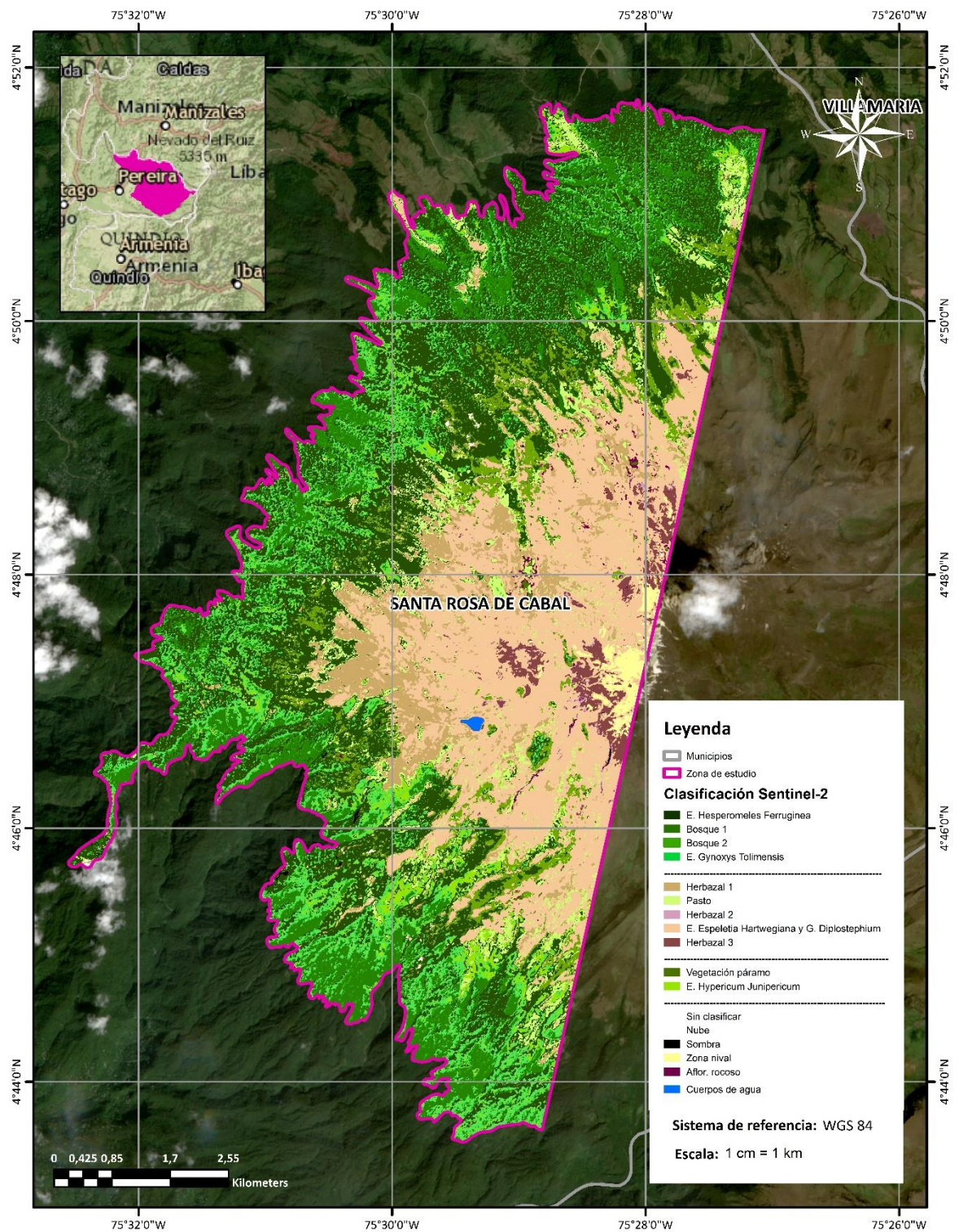


Figura 12 - Clasificación de la imagen multiespectral.

○ VALIDACIÓN

Para evaluar la exactitud de la clasificación producida con la imagen multiespectrales se implementa la matriz de confusión, el resultado se observa en la Tabla 12, donde la diagonal indica el número de casos clasificados correctamente por cada clase y los valores fuera de ella son los casos erróneamente clasificados; Se evidencia la confusión en la clasificación entre las clases *Espeletia hartwegiana* y el Herbazal 3 y la exactitud del clasificador y las muestras en las clases de zona Nival y Bosque 2.

Tabla 12 - Matriz de confusión de la clasificación de la imagen multiespectral.

Nombre de la clase	ZN	HF	B1	H1	B2	P	GT	H2	AR	RH/D	H3	VP	HJ	Verdad de terreno
Zona nival (ZN)	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
Hesperomeles ferrugina (HF)	0	65	2	1	1	3	4	0	0	0	0	8	1	85
Bosque 1 (B1)	0	4	75	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	84
Herbazal 1 (H1)	0	0	0	71	0	2	0	0	0	10	0	0	0	83
Bosque 2 (B2)	0	0	1	0	52	0	3	0	0	0	0	0	0	56
Pasto (P)	0	0	0	2	0	90	0	0	1	5	0	4	0	102
Gynoxys tolimensis (GT)	0	11	4	0	0	0	99	0	0	0	0	0	3	117
Herbazal 2 (H2)	0	0	0	0	0	0	0	57	1	0	3	0	0	61
Afloramiento rocoso (AR)	0	0	0	0	0	0	0	3	38	0	0	1	0	42
Espeletia hartwegiana y Diplostephium (RH/D)	0	0	0	7	0	2	0	13	0	153	21	24	0	220
Herbazal 3 (H3)	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	107	0	0	111
Vegetación páramo (VP)	0	8	0	0	0	1	0	0	2	4	0	58	0	73
Hypericum juniperium (HJ)	0	10	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	54	69
TOTAL	33	98	82	81	53	98	115	74	44	173	131	96	58	1136

En la Tabla 13 se muestran los porcentajes de aciertos por cada clase organizadas de menor a mayor exactitud en la clasificación, con los valores más bajos en las clases “Vegetación páramo” y “*Hesperomeles ferruginea*” y los más altos, “Zona nival” y “Bosque 2”, los rangos de porcentajes de casos clasificados correctamente están entre el 60 y el 100% aproximadamente.

Tabla 13 - Porcentaje de casos de clasificación correctos.

Nombre de la clase	Píxeles clasificados correctamente	Total de píxeles clasificados	Porcentaje clasificado correctamente (%)
Vegetación páramo	58	96	60,417
Hesperomeles ferrugina	65	98	66,327
Herbazal 2	57	74	77,027
Herbazal 3	107	131	81,6794
Gynoxys tolimensis	99	115	86,087
Afloramiento rocoso	38	44	86,364
Herbazal 1	71	81	87,654
Espeletia hartwegiana y Diplostephium	153	173	88,439
Bosque 1	75	82	91,463
Pasto	90	98	91,837
Hypericum juniperium	54	58	93,103
Bosque 2	52	53	98,113
Zona nival	33	33	100,00

En la Tabla 14 se sintetizan los índices de clasificación correcta, obtenidos de la matriz de confusión, con valores por encima de 0,8 dentro del rango de 0 a 1, lo que indica que los valores obtenidos son considerablemente positivos para la clasificación de las imágenes multiespectrales; es preciso mencionar que estos índices obtuvieron valores mayores a los de la clasificación con la imagen hiperespectral, una de las razones sería la diferencia notable en las resoluciones espaciales.

Tabla 14 - Índice de precisión de la clasificación Kappa.

Índice de clasificación correcta	
General	0,838
Kappa	0,822

11.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODIVERSIDAD Y VARIABLES DE INTERES

- SISTEMA DE DRENAJE
 - MDE

Se obtiene entonces un MDE sin depresiones que incurran en errores posteriores en los cálculos; el MDE también permite identificar como aumenta la elevación hacia el centro de la zona de estudio y las formaciones por donde circulan los flujos de agua.

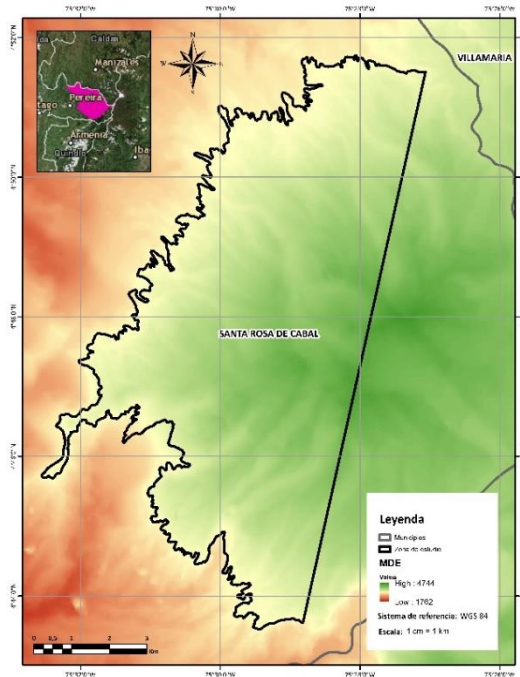


Figura 13 - MDE previamente llenado.

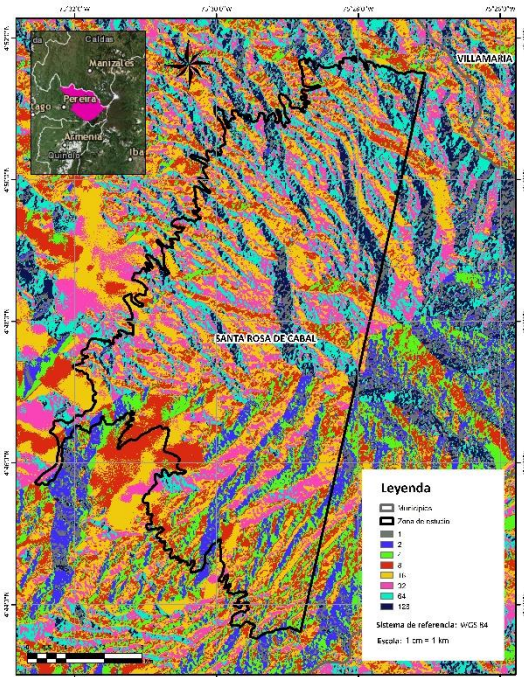


Figura 14 - Resultado de las direcciones de flujo.

○ DETERMINACIÓN DE LAS DIRECCIONES DE FLUJO

El resultado de ese proceso se evidencia en la Figura 14 donde a cada pixel tiene asociado la dirección de flujo en relación con los ocho pixeles vecinos; esta variable es el principal criterio para indicar los niveles de acumulación de flujo

○ DETERMINACIÓN DE LAS ACUMULACIONES DE FLUJO

En primer lugar, se produce un raster donde a cada pixel se le asocian las acumulaciones de flujo, dependiendo de las direcciones de flujo de los pixeles vecinos; algunas de las acumulaciones pueden tomar el valor de cero, es decir, parteaguas o, por ejemplo, poseer los valores más altos que correspondería a los cauces principales, el raster toma valores de 0 a 932304. Por lo anterior se debe establecer un umbral mínimo de acumulaciones de flujo, por lo que se escoge 1000 ya que da lugar a un detalle suficiente de la red de drenaje. El

resultado es un raster con cero y uno, donde los pixeles que poseen cero no cumplen las condiciones y los que toman uno si lo hacen.

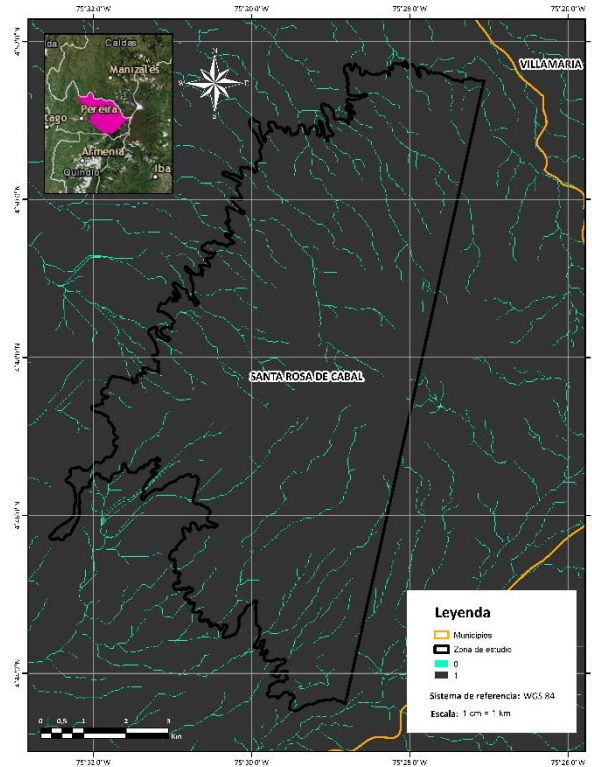


Figura 15 - Resultado de las acumulaciones de flujo.

○ PASO DE RASTER DE ACUMULACIONES DENTRO DEL UMBRAL A RED DE DRENAJE VECTORIAL

En esta sección se evidencia la red de drenaje de la zona de estudio y según Mejía y Niemann, (2008), el patrón que esta posee puede identificarse por medio de la inspección de la geometría y encasillarse en un patrón básico y luego en un patrón modificado. Además, los mismos autores aseguran que el patrón de la red de drenaje puede verse afectado por la litología y la tectónica de la zona.

La red de la zona de estudio corresponde a un patrón paralelo, se caracteriza porque los flujos de la red de drenaje tienden a ser rectos y los cauces principales paralelos entre sí, entre otras características, que se evidencia en la Figura (16). De acuerdo con estas características la zona de estudio posee pendientes moderadas a empinadas con relieves alargados (Mejía y Niemann, 2008).

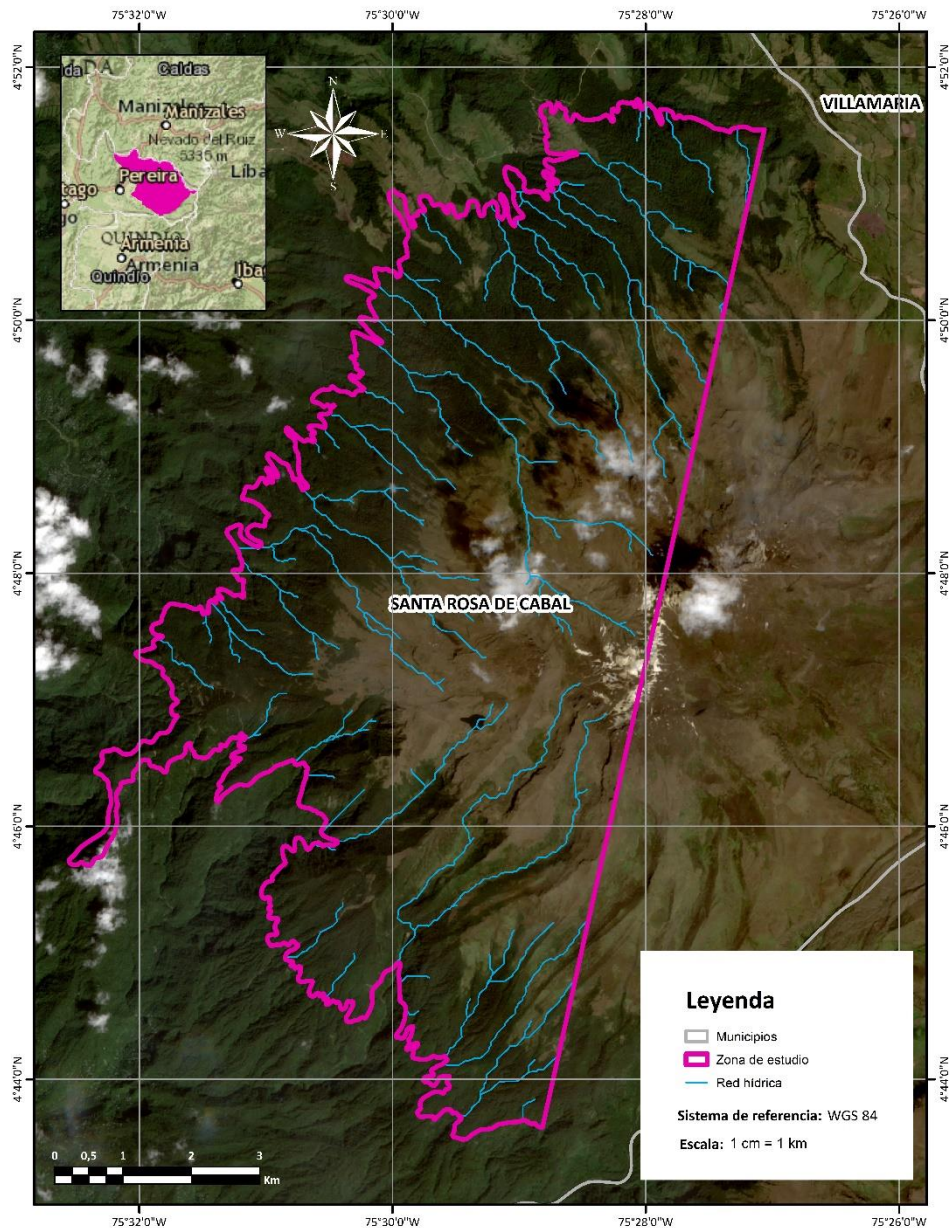


Figura 16 - Red de drenaje de la zona de estudio.

- **MAPA PENDIENTES Y CURVAS DE NIVEL**

- **MAPA DE PENDIENTES**

El resultado en ese punto indica que la pendiente de la zona oscila entre 0% y 35 %, para cada pixel de la zona de estudio. Los valores de pendiente muy altos indican en su mayoría

cortes fuertes en el terreno o la parte baja de una colina en el sector La pendiente, la cual es un factor topográfico, posee una fuerte relación con la distribución de las plantas [32].

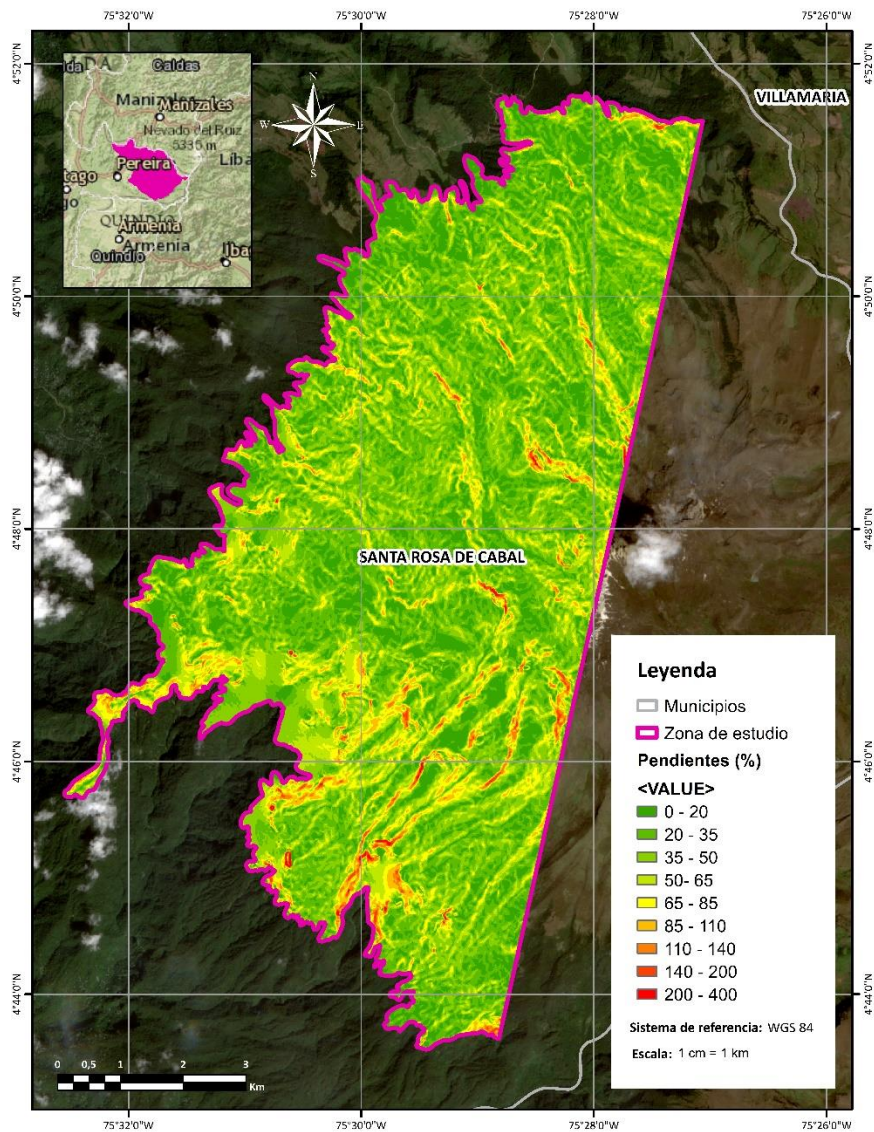


Figura 17 - Mapa de pendientes de la zona de estudio.

En concordancia con lo que indica la red de drenaje, las pendientes en el terreno son en su mayoría empinadas (+90%) y moderadas en una menor proporción (+8%).

Tabla 15 - Rangos de pendientes y porcentajes de equivalencia.

Rango de pendiente (%)	Porcentaje al que equivale en la zona de estudio (%)
0 - 5	0.17

5 - 15	8.46
> 15	91.37

○ MAPA DE CURVAS DE NIVEL

Las curvas de nivel de la zona están cada 100m y van desde la cota más baja de 3200m a 4400m (ver la Figura 18); la bondad de ese resultado es que encierra determinadas zonas que se encuentran dentro de un rango de altitud y el efecto que puede tener esta variable en la ubicación espacial de determinada especie.

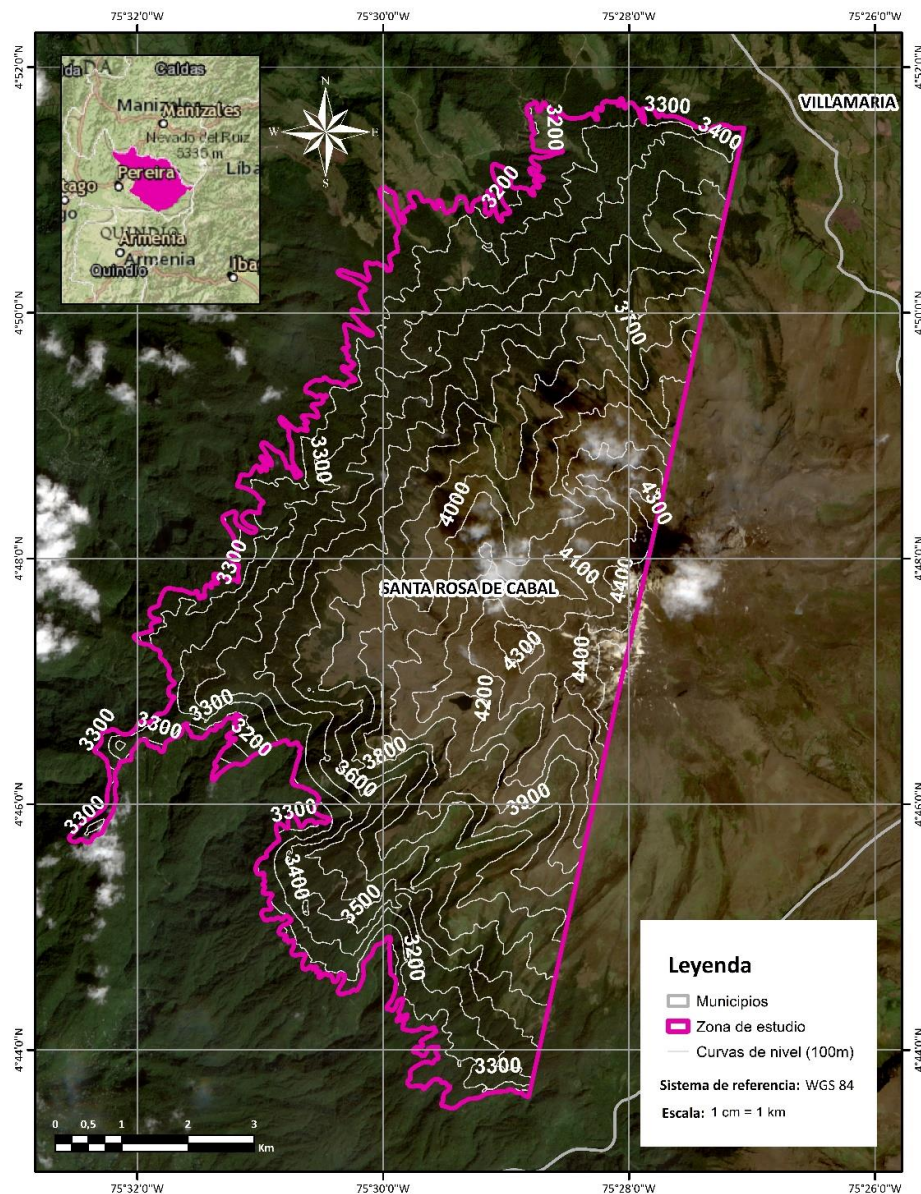


Figura 18 - Mapa de curvas de nivel de la zona de estudio.

Según lo anterior se cuantifican las dos clases más representativas presentes entre un rango específico de curvas de nivel evidenciando así la relación espacial que existe entre estas dos variables, ya que se logra observar que a medida que aumenta o disminuye la elevación de terreno las clases de la zona de estudio tienden a cambiar o, dicho de otro modo, que una determinada clase se encuentra casi que delimitada por una curva de nivel específica, como se presenta en la Figura 19.

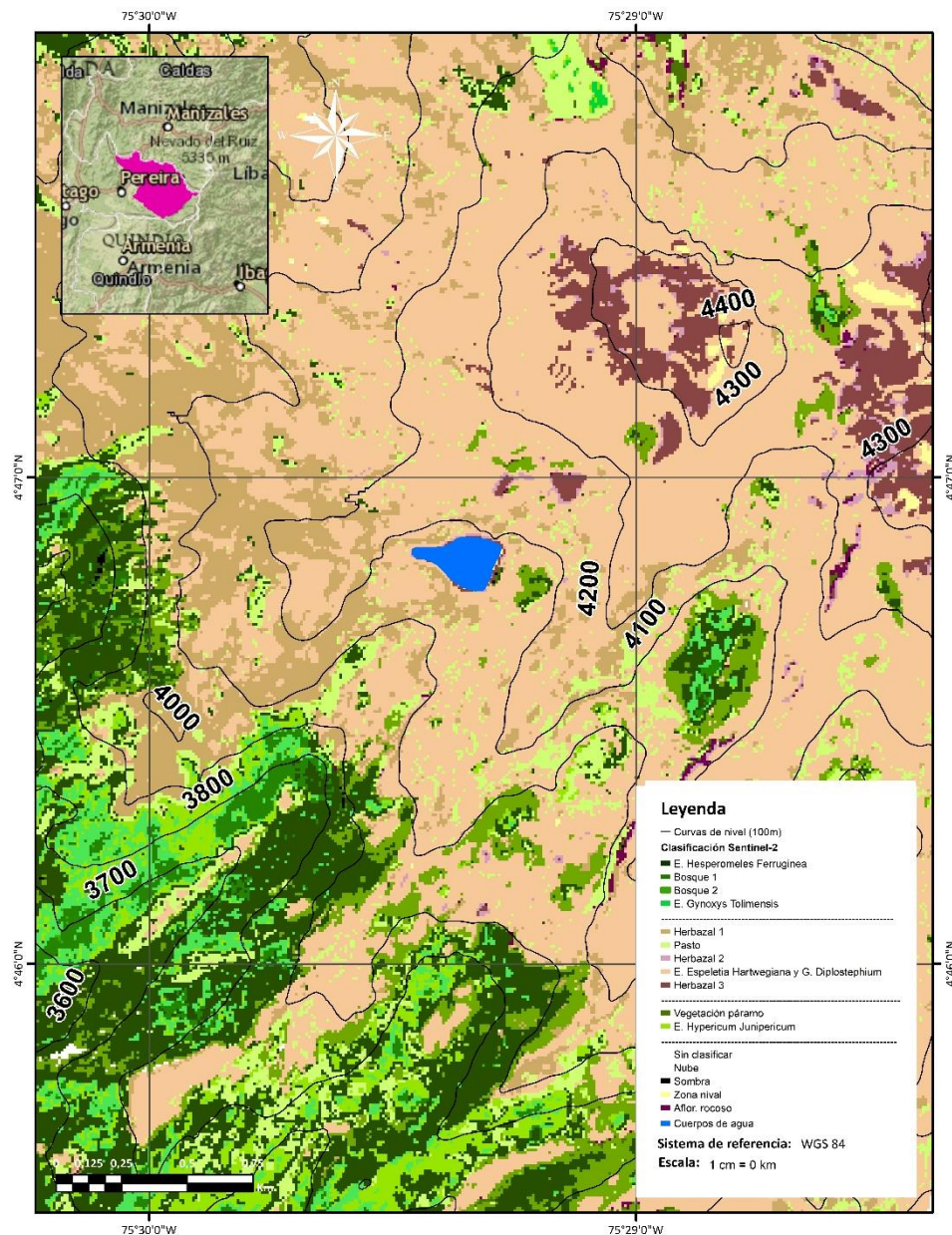


Figura 19 - Relación espacial entre las curvas de nivel y las clases.

En las Tablas 16 y 17, se sintetizan las clases predominantes con los respectivos porcentajes de área de la zona de estudio, se observa la tendencia de un cierto grupo de clases a estar presentes en determinadas elevaciones y el cambio de vegetación de páramo propiamente dicho a sub páramo entre las cotas de los 3900 a los 3800 metros. Por otro lado, la zona nival, claramente predomina entre las cotas 4400 y 4500m.

Tabla 16 – Clases predominantes entre rangos de curvas de nivel en la clasificación de la imagen hiperespectral.

Cota	Clases predominantes	Porcentaje clase (%)
4500 a 4400 m	Zona nival	28
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	26
4400 a 4300 m	Herbazal 3	53
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	24
4300 a 4200 m	Herbazal 3	40
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	28
4200 a 4100 m	Herbazal 1	39
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	21
4100 a 4000 m	Herbazal 1	53
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	11
4000 a 3900 m	Herbazal 1	53
	Hesperomeles ferrugina	12
3900 a 3800 m	Hesperomeles ferrugina	31
	Herbazal 1	28
3800 a 3700 m	Hesperomeles ferrugina	47
	Bosque 2	13
3700 a 3600 m	Hesperomeles ferrugina	65
	Hypericum juniperium	8
3600 a 3500 m	Hesperomeles ferrugina	70
	Hypericum juniperium	8
3500 a 3400 m	Hesperomeles ferrugina	76
	Hypericum juniperium	9
3400 a 3300 m	Hesperomeles ferrugina	73
	Hypericum juniperium	14
3300 a 3100 m	Hesperomeles ferrugina	66
	Hypericum juniperium	16

Tabla 17 - Clases predominantes entre rangos de curvas de nivel en la clasificación de la imagen multispectral.

Cota	Clases predominantes	Porcentaje clase (%)
4500 a 4400 m	Zona nival	63
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	18
4400 a 4300 m	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	38
	Herbazal 3	37
4300 a 4200 m	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	74
	Herbazal 3	17
4200 a 4100 m	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	81
	Herbazal 1	10
4100 a 4000 m	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	66
	Herbazal 1	20
4000 a 3900 m	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	58
	Herbazal 1	18
3900 a 3800 m	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	32
	Hesperomeles ferrugina	20
3800 a 3700 m	Hesperomeles ferrugina	39
	Vegetación páramo	16
3700 a 3600 m	Hesperomeles ferrugina	54
	Vegetación páramo	13
3600 a 3500 m	Hesperomeles ferrugina	50
	Gynoxys tolimensis	16
3500 a 3400 m	Hesperomeles ferrugina	40
	Bosque 1	28
3400 a 3300 m	Hesperomeles ferrugina	39
	Bosque 1	32
3300 a 3100 m	Hesperomeles ferrugina	38
	Bosque 1	30

• GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología de la zona es originada por la actividad vulcano-glacial que hasta la época contemporánea ha actuado sobre esta zona de la cordillera central de Colombia [43].

Se pueden identificar tres (3) conjuntos litológicos, así como numerosos relieves y acumulaciones de origen volcánico y glacial. El conjunto metamórfico está representado por rocas metamórficas del Precámbrico y del Paleozoico, recubierto por materiales Vulcano-glaciales, están caracterizadas por una morfología variada debido a la diversidad

composicional y litológica de las unidades geológicas que lo constituyen. Se presenta en la zona un drenaje dendrítico y subangular. La topografía es abrupta, especialmente en las rocas cuarzosas, con cerros y divisorias de aguas, son de alguna manera simétricas y presentan rasgos erosivos medios causados por efectos del fallamiento y de la actividad humana [43].

Todo el terreno volcánico muestra haber sido afectado por fenómenos glaciares. Los grandes escarpes de más de 100 m fueron generados por los depósitos de lava antiguos. Los relieves y formaciones de origen glaciar se evidencian a partir de los 3000-3200 m.s.n.m. Se presentan vales con sección transversal en forma de U a través de formas de erosión o de acumulación, que actualmente están sometidos a erosión fluvial. La presencia de circos glaciales a lado y lado de una divisoria de aguas genera el aspecto dentado a la topografía de la región [43].

Se presentan morrenas laterales y algunas frontales como formas de acumulación que permiten definir varios estadios de avance de los casquetes glaciales, las que están en elevaciones inferiores a 4500 m.s.n.m. están recubiertas por depósitos piroclásticos y vegetación, las que están a mayor elevación carecen de estas coberturas [43].

• GEOLOGÍA

El núcleo de la cordillera Central está conformado por el Complejo Metamórfico Paleozoico de Cajamarca, las características son similares a las de las márgenes de placas continentales donde opera el choque de placas litosféricas oceánica y continental. En la región el Cretáceo está formado por una secuencia volcánica (rocas toleíticas, basaltos, diabasas y localmente lavas almohadillas) y otra sedimentaria [43]

La cordillera Central está caracterizada por el vulcanismo andesítico cuaternario que se extiende desde los Andes de Nariño hasta la cadena volcánica Ruiz-Tolima, que constituye el conjunto volcánico más septentrional de la cordillera [43].

Las fallas que afectan la cordillera central son longitudinales, presentan las fracturas principales en los flancos Este y Oeste que hacen parte del sistema de fallas de Romeral, de especial interés la falla de la Palestina que se constituye en el eje del macizo volcánico [43].

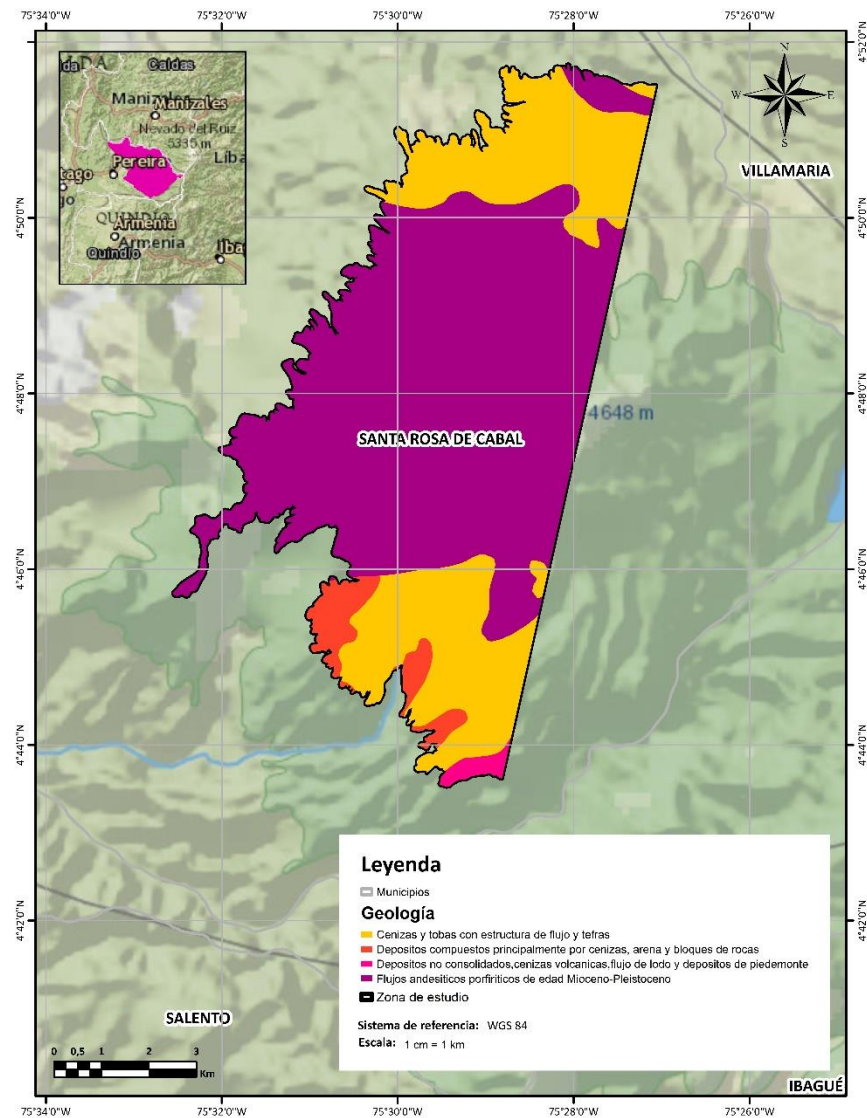


Figura 20 - Mapa de geología de la zona de estudio. Fuente de información: WWF - Colombia

• CLIMA

○ CÁLCULO DE TEMPERATURA DE BRILLO

De la temperatura de brillo se deriva la temperatura superficial de la tierra, por lo que ambos resultados están estrechamente ligados; en este caso se obtuvo un raster de valores de temperatura de brillo a 30m de resolución espacial, que oscila entre 3.7 y 23.0 °C, se evidencia que los valores más bajos corresponden a zonas con mayor presencia de vegetación, nieve o cuerpos de agua y los más altos a las zonas de herbazal.

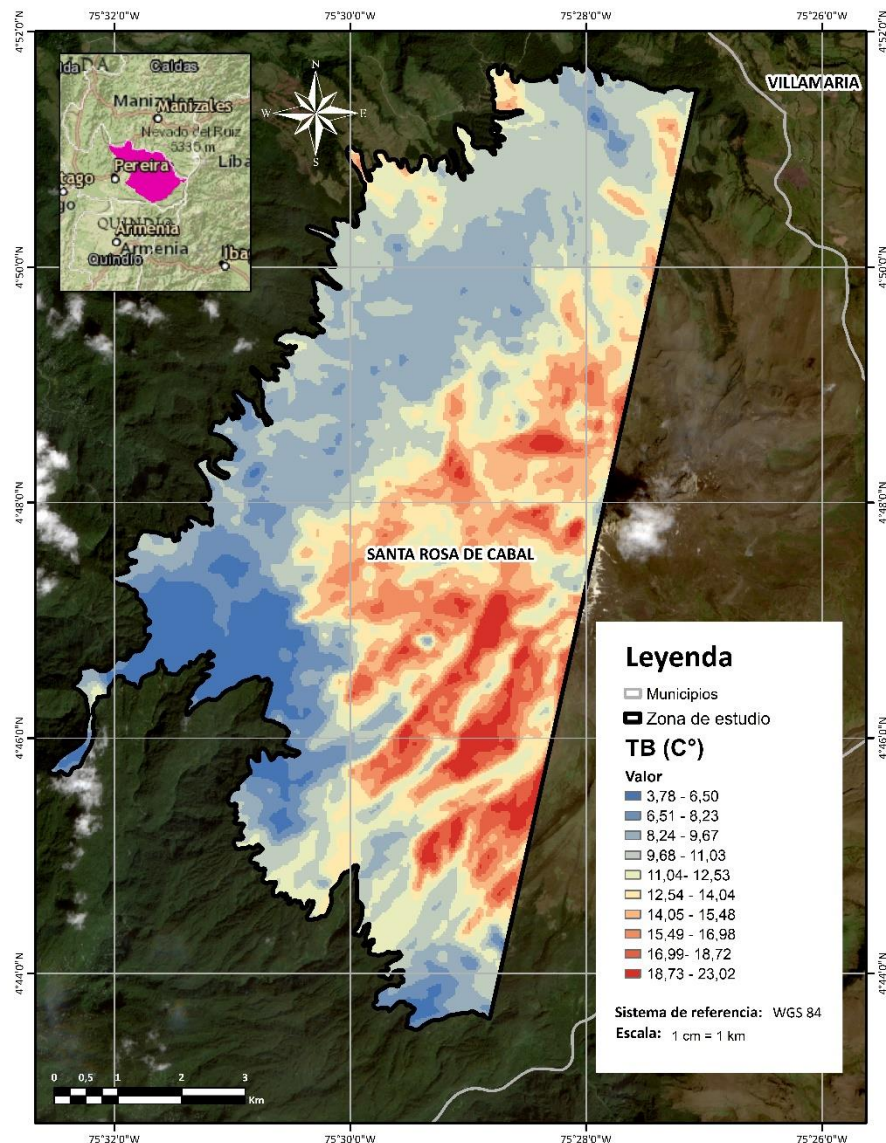


Figura 21 - Temperatura de brillo de la zona de estudio.

○ CÁLCULO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

Para la temperatura superficial de la tierra se obtuvo un raster de 30m de resolución espacial, con valores que oscilan entre 5.11 y 24.86 °C, se evidencia que los valores más bajos corresponden a zonas con mayor presencia de vegetación, nieve o cuerpos de agua y los más altos a las zonas de herbazal; según [8] la TST tiene relación con la temperatura del aire y con diversos procesos terrestres y se utiliza en la elaboración de diferentes estudios de ecología, hidrología, biogeología, etc.

Las especies de plantas poseen diferentes temperaturas a nivel de dosel y su distribución puede afectar la TST [44].

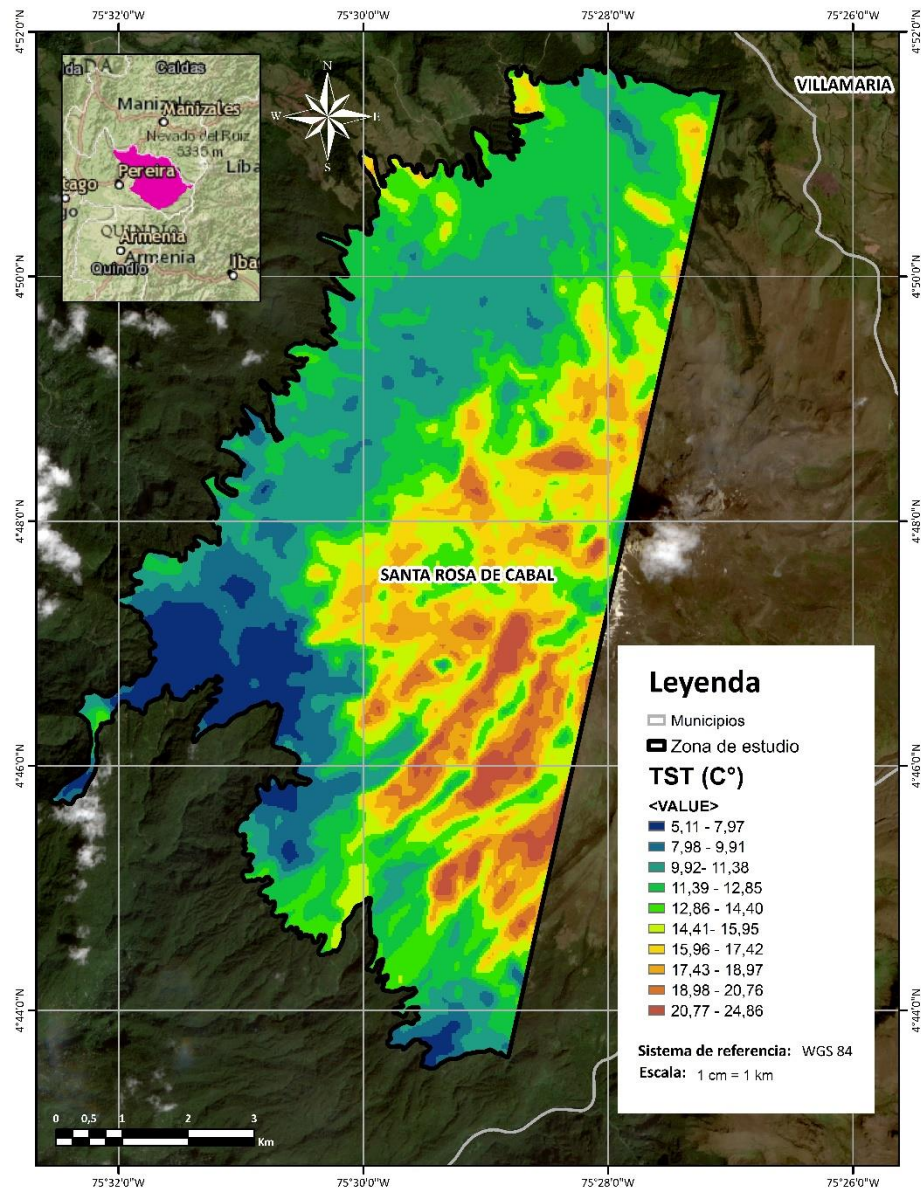


Figura 22 - Temperatura superficial de la tierra.

En base a la hipótesis anterior se cuantifican las dos clases de comunidades forestales más representativas presentes entre un rango específico de temperatura superficial de la tierra, demostrando así la relación espacial que existe entre ambas variables, ya que se logra observar que a medida que aumenta o disminuye la temperatura superficial de la tierra las clases de la zona de estudio tienden a cambiar o, dicho de otro modo, que una determinada clase tiende a presentarse en rango de temperatura superficial de la tierra específico, ver la

Figura 20, donde para el rango 12,86 - 14,40 se evidencia como estos valores de TST bordean la clara transición entre páramo propiamente dicho y sub-páramo.

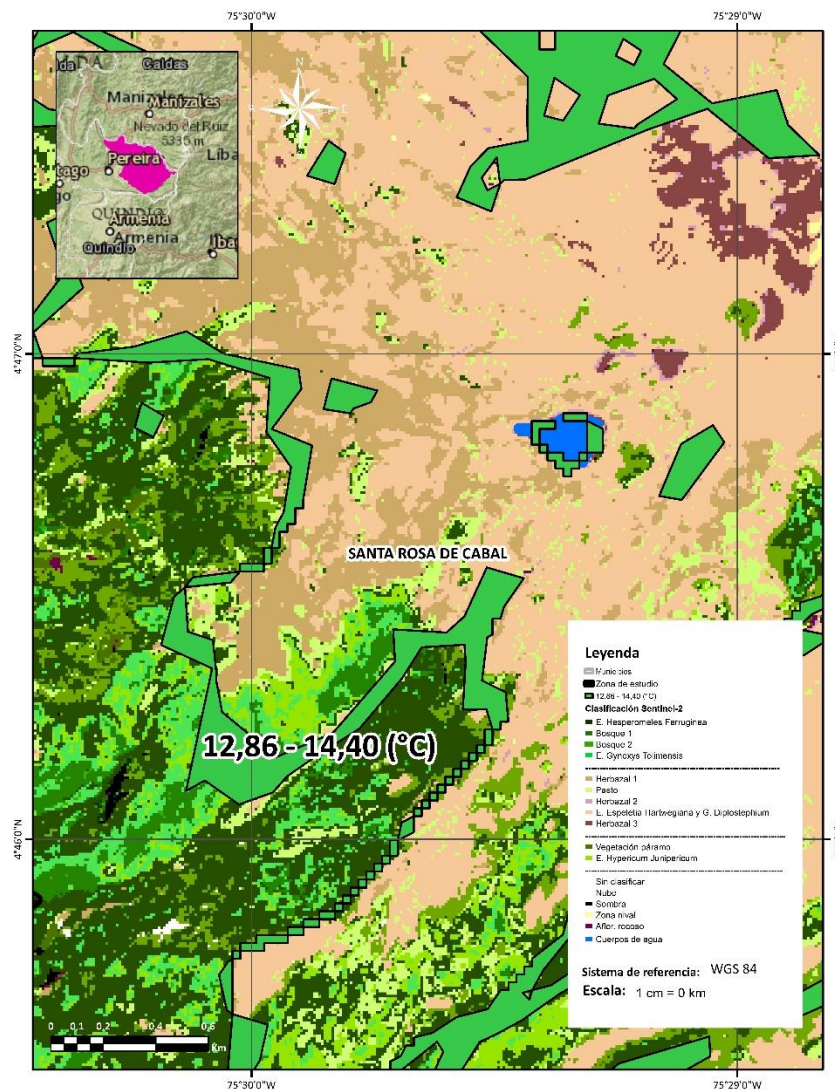


Figura 23 - Relación espacial entre la temperatura superficial de la tierra y las clases.

En las Tablas 18 y 19 se sintetizan las clases predominantes con los respectivos porcentajes de área de la zona de estudio y se observa que existe una tendencia de un cierto grupo de clases a estar presentes en determinados rangos de TST, que la vegetación arbórea y arbustal alta se encuentra en valores más bajos de TST que las de páramo propiamente dicho y que el cambio entre estas dos zonas se da alrededor de los 14,40 °C.

Tabla 18 - Clases predominantes entre rangos de temperatura superficial de la tierra en la clasificación de la imagen hiperespectral.

Rango TST (°C)	Clases predominantes	Porcentaje clase ()
5,11 - 7,97	Hesperomeles ferrugina	57
	Hypericum juniperium	20
7,98 - 9,91	Hesperomeles ferrugina	62
	Hypericum juniperium	7
9,92 - 11,38	Hesperomeles ferrugina	87
	Hypericum juniperium	2
11,39 - 12,85	Hesperomeles ferrugina	76
	Hypericum juniperium	8
12,86 - 14,40	Hesperomeles ferrugina	35
	Hypericum juniperium	13
14,41 - 15,95	Herbazal 1	30
	Herbazal 3	12
15,96 - 17,42	Herbazal 1	44
	Herbazal 3	11
17,43 - 18,97	Herbazal 1	42
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	11
18,98 - 20,76	Herbazal 1	36
	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	27
20,77 - 24,86	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	53
	Herbazal 1	26

Tabla 19 - Clases predominantes entre rangos de temperatura superficial de la tierra en la clasificación de la imagen multispectral.

Rango TST (°C)	Clases predominantes	Porcentaje clase ()
5,11 - 7,97	Hesperomeles ferrugina	41
	Bosque 1	26
7,98 - 9,91	Hesperomeles ferrugina	48
	Gynoxys tolimensis	19
9,92 - 11,38	Hesperomeles ferrugina	56
	Gynoxys tolimensis	14
11,39 - 12,85	Hesperomeles ferrugina	41
	Bosque 1	23
12,86 - 14,40	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	22

	Hesperomeles ferrugina	19
14,41 - 15,95	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	45
	Herbazal 1	11
15,96 - 17,42	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	54
	Herbazal 1	13
17,43 - 18,97	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	60
	Herbazal 1	12
18,98 - 20,76	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	55
	Pasto	12
20,77 - 24,86	Espeletia hartwegiana y Diplostephium	66
	Pasto	16

○ PRECIPITACIÓN

El Parque Natural Nacional (PNN) Los Nevado cuenta con un tipo de precipitación bimodal, es decir con dos periodos húmedos y dos secos, por lo general bien definidos, los cuales son abril-mayo, octubre-noviembre y diciembre-febrero, julio-agosto, respectivamente [43].

Adicional a esto los autores indican que en la occidental del PNN Los Nevados, en donde se encuentra el Paramillo de Santa Rosa, la precipitación promedio es 400mm/mes en las épocas más húmedas y 100mm/mes en las más secas.

12. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este proyecto para la implementación del método de clasificación se realizó el pre procesamiento de la imagen hiperespectral, este procesamiento consistió en la corrección atmosférica, la reducción de la dimensionalidad y la corrección geométrica a partir del modelo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), tratamiento que también fue aplicado por [31] y [35], quienes adicionalmente lo evaluaron junto con el modelo QUAC (Quick Atmospheric Correction) y encontraron que el método FLAASH tiene un mejor comportamiento, lo que proporcionó mejor calidad de las imágenes para la posterior clasificación.

La clasificación de las especies de comunidades arbóreas se desarrolló a partir de tres procesos: muestras de entrenamiento, clasificación y validación. Inicialmente se identificó las diferentes clases existentes en las imágenes y se tomó los datos de entrenamiento que las representan, luego de obtener estos datos se clasificaron las imágenes mediante el método de Mapeo de Angulo Espectral, del que se obtuvieron dos imágenes clasificadas con resultados similares, de igual manera [19] aplicó el mismo método y obtuvo una

clasificación que les permitió la caracterización de los rodales en términos de composición de especies principales y elaboraron una cartografía asociada a la clasificación que de igual manera para este trabajo se hizo con el objetivo de obtener información útil para determinar la distribución espacial de las especies clasificadas.

Para la validación de las clasificaciones realizadas se calcularon los índices Global y Kappa obtenidos de la matriz de confusión, método utilizado por [25], lo aplicaron a un amplio grupo de puntos aleatorios escogidos por clase, basados en el registro de la información de la recolecta de especímenes “in situ”. En este estudio para la clasificación de la imagen hiperespectral se obtuvo un valor global de 0,795 y para la imagen multiespectral un valor de 0,838 lo que representa un alto nivel de acierto ya que el valor de mayor coincidencia es 1. En el estudio de [19] obtienen una precisión global de 0,853 en la clasificación de la imagen hiperespectral, donde concluyen que el empleo de la imagen hiperespectral posibilitó comprobar la presencia de especies poco representativas, mientras que el método de terreno no las detectó. Contrario a lo obtenido en este estudio, los resultados con mayor precisión no se obtuvieron de la imagen hiperespectral debido a la alta resolución espacial de la imagen multiespectral (10 m), que permitió un análisis más detallado a nivel de pixel, se realizó una asignación de clases más detallada y diferenciada una de otra.

En este caso hubo mejor resultado en cuanto a precisión de la clasificación debido a la alta resolución espacial por encima de la resolución espectral de las imágenes hiperespectrales, sin embargo [19] afirma que disponer de altas resoluciones espectrales resulta más determinante para clasificar especies que contar con altas resoluciones espaciales, eso sí, empleando imágenes multiespectrales en lugar de hiperespectrales.

Es necesario incluir más autores para la discusión de los resultados. La comparación se debe realizar tal como lo hicieron para el proceso de clasificación, demostrando con cifras lo que se obtuvo y comparando con las cifras del autor consultado, de lo que se desprende una reflexión sobre la similitud o diferencia de los resultados obtenidos en ambos estudios.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En suma, los métodos para la construcción de un conocimiento base del ecosistema de páramo, “Paramillo de Santa Rosa” para el acercamiento al inventario forestal, funcionaron correctamente para la producción de variables sobre la zona de estudio como lo son: la clasificación de comunidades de especies, drenaje, curvas de nivel, mapa de pendientes, temperatura superficial de la tierra, etc. Y para encontrar algunas relaciones espaciales existentes entre sí.

Si bien es cierto que para las clasificaciones de comunidades de especies con imágenes hiperespectrales y multiespectrales fue posible obtener valores optimistas de exactitud con el índice Kappa del 0.77 y 0.82, respectivamente, se presentan una serie de recomendaciones encaminadas al mejoramiento del producto final, como lo son, encontrar el equilibrio entre una resolución geométrica de las imágenes mucho más fina y una apropiada resolución espectral, para mejorar la discriminación de comunidades de especies e incluso, llevarlo al nivel de reconocimiento de individuos forestales; y la implementación de una recolección de muestras en campo más exhaustiva y amplia, aunque claramente mucho menor a la necesaria para la implementación de metodologías sin sensoramiento remoto.

La clasificación, con ambos sensores, permitió caracterizar a nivel de cobertura la zona de estudio, al igual que las variables: drenaje, mapa de pendientes, curvas de nivel, geomorfología, geología, temperatura superficial de la tierra y precipitación, dieron lugar a un conocimiento más amplio de la misma; asimismo se constata la clara relación espacial que existe entre las comunidades de especies y variables como temperatura superficial de la tierra y curvas de nivel y se extraen el rango de valores para estas mismas, donde ocurre la transición entre páramo propiamente dicho y sub-páramo; adicionalmente se consigue confrontar conceptos como la relación entre drenaje paralelo y topografía, al confirmar por ambos medios la predominancia de un relieve con pendientes moderadas a empinadas.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Vargas Ríos, "Impacto del fuego y pastoreo sobre el medio ambiente páramo", pp. 65–72, 1996.
- [2] IDEAM, "Diseño del marco conceptual y metodológico del inventario forestal nacional," p. 142, 2009.
- [3] D. Rivera Ospina y C. Rodríguez, "GUÍA DIVULGATIVA DE CRITERIOS PARA LA DELIMITACIÓN DE PÁRAMOS DE COLOMBIA," 2011.
- [4] A. E. Baca-G, "REFLEXIONES SOBRE LOS PROCESOS DE OCUPACIÓN HUMANA EN LOS PÁRAMOS. SITUACIÓN ACTUAL DEL PÁRAMO VOLCÁN CHILES, COLOMBIA", Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, Vol. 17, pp. 217 - 226, 2014.
- [5] P. Ghamisi, J. A. Benediktsson, and S. Phinn, "Land-cover classification using both hyperspectral and LiDAR data," *Int. J. Image Data Fusion*, vol. 6, no. 3, pp. 189–215, 2015.
- [6] L. Ma, M. Li, X. Ma, L. Cheng, P. Du, Y. Liu, "A review of supervised object-based land-cover image classification", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 130, pp. 277-293, 2017.
- [7] G. Chander, B.L. Markham, D.L. Heider, "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, pp. 893-903, 2009.
- [8] J. Zhang, Y. Wang, Y. Li, "A C++ Program for Retrieving Land Surface Temperature from the Data of Landsat TM/ETM+ band 6", *Computers and Geosciences*, Vol. 32, pp. 1796-1805, 2006.
- [9] A. B. Ariza-Villaverde, F. J. Jiménez-Hornero y E. Gutiérrez de Ravé, "Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis", *Geomorphology*, Vol. 241, pp. 243-254, 2015.
- [10] Portafolio, "Colombia contará con su primer inventario forestal nacional", Available: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-contara-primer-inventario-forestal-nacional-36012>, 2015.
- [11] IDEAM, ECOACSA, "Colombia pone en marcha un Inventario Forestal Nacional para conocer el estado de sus bosques naturales | Mercados de Medio Ambiente," 2015. [Online]. Available: <http://www.mercadosMDEedioambiente.com/actualidad/colombia-pone-en-marcha-un-inventario-forestal-nacional-para-conocer-el-estado-de-sus-bosques-naturales/>.
- [12] IDEAM, "Gestión biodiversidad - IDEAM," 2014. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/gestionbiodiversidad>.
- [13] Harrys Geospatial Solutions, Inc. Harrys Geospatial. s.f. FLAASH Atmospheric Correction Model. Septiembre de 2016.
- [14] J. Louis, V. Debaecker, B. Pflug, M. Main-Knorn, J. Bieniarz, U. Mueller-Wilm, E. Cadau y F.

Gascon, "SENTINEL-2 SEN2COR: L2A PROCESSOR FOR USERS", Living Planet Symposium 2016, 2016.

- [15] D. Schlöpfer, C.C. Borel, J. Kellerv y K.I. Itten, "Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapour", Remote Sensing Environment, Vol. 65, pp. 353- 366, 1998.
- [16] S.B. Ferrero, M.G. Palacio, O. Campanella, "Análisis de Componentes Principales en Teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación". Universidad Nacional de Rio Cuarto. Córdoba, Argentina. 2007.
- [17] P. R. Rajarapolu y V. R. Mankar, "Bicubic Interpolation Algorithm Implementation for Image Appearance Enhancement ", International Journal of Computer Science And Technology, Vol. 8, pp. 23 - 26, 2017.
- [18] T.N. Carlson, D.A. Ripley, "On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index", Remote Sensing of Environment, Vol. 62, pp. 241-252, 1997.
- [19] M. A. Roig alboil, "IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FORMACIONES FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES HIPERESPECTRALES AÉREAS", UNIVERSIDAD MAYOR, 2010.
- [20] S. K. Jenson y O. Domingue, "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, Vol. 54, pp. 1593-1600, 1988.
- [21] M. I. Ashraf, Z. Zhao, C. P.-A. Bourque y F. Meng, "GIS-evaluation of two slope-calculation methods regarding their suitability in slope analysis using high-precision LiDAR digital elevation models", HYDROLOGICAL PROCESSES, Vol. 26, pp. 1119-1133, 2012.
- [22] O. Huisman y R. A. de By, "Principles of Geographic Information System", 2009.
- [23] T. Wang, "An algorithm for extracting contour lines based on interval tree from grid DEM", Geo-spatial Information Science, Vol. 11, pp. 103-106, 2008.
- [24] Rashmi, S. Addamani, Venkat y Ravikiran, "Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification", IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 1, pp. 201-205, 2014.
- [25] T. Boca y G. Rodriguez, "Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos". Investigación. pp. 1 - 24. 2012.
- [26] S. Moharana y S. Dutta, "Spatial variability of chlorophyll and nitrogen content of rice from hyperspectral imagery", 122, p. 17-29, 2016.
- [28] J. G. Rejas Ayuga, "TRATAMIENTO DIGITAL PREVIO DE LAS IMÁGENES", Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, p. 43, 2008.
- [29] R.A. Serna, "Recolecta y Descripción de especímenes Botánicos". Investigación. Santiago de Cali, 2017.

- [30] B. Datt, T. McVicar, T. Van Niel, D. Jupp, J. Pearlman, "Preprocessing EO-1 Hyperion Hyperspectral Data to Support the Application of Agricultural Indexes." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 1246-1259, 2003.
- [31] B.C. Gao, O. Davis Curtiss, A.F.H. Goetz, "A review of atmospheric correction techniques for hyperspectral remote sensing of land surfaces and ocean colour", pp. 1979–1981, 2006.
- [32] M. Clark, D.D. Roberts y D.B. Clark, "Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales". *Remote Sensing of Environment*. Vol 96, 375-398. 2005.
- [33] N. Rani, V. Ravibabu Mandla y T. Singh, "Performance of image classification on hyperspectral imagery for lithological mapping", 2016.
- [34] Y. Guo y F. Zeng, "ATMOSPHERIC CORRECTION COMPARISON OF SPOT-5 IMAGE BASED ON MODEL FLAASH AND MODEL QUAC", *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B7, p. 7-11, 2012.
- [35] N. Rani, V. Ravibabu, T. Singh, "Evaluation of atmospheric corrections on hyperspectral data with special reference to mineral mapping", p. 1-12, 2016.
- [36] Adler-oro, SM, MW Mateo, LS Bernstein, RY Levine, A. Berk, SC Richtsmeier, PK Acharya, GP Anderson, G. Felde, J. Gardner, M. Hoke, LS Jeong, B. Pukall, A. Ratkowski y H.-H Burke, "Corrección atmosférica de onda corta espectral imágenes basadas en MODTRAN4", *SPIE Proceedings En las imágenes de Espectrometría*, vol. 3753, pp. 61-69, 1999.
- [37] Kaufman, YJ, AE Wald, LA Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, y L. Flynn, "El MODIS 2.1-mm-Canal Correlación con reflectancia visible para su uso en la teleobservación de aerosol", *IEEE Transactions on Geoscience y la teledetección*. Vol. 35, pp. 1286-1298, 1997.
- [39] A.A. Green, M. Berman, P. Switzer y M.D. Craig, "A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 26, pp. 65-74, 1988.
- [40] RSI, Research Systems Incorporation. ENVI (Environment for Visualizing Images) online help. Boulder. ITT Visual Information Solutions. 2009.
- [41] U. Amato, R.M. Cavalli, A. Palombo, S. Pignatti, y F. Santini. "Experimental approach to the selection of the components in the Minimum Noise Fraction". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 40. pp. 153-160. 2009.
- [42] R.A. Serna, "APROXIMACIÓN A LA CLASIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN". Investigación. Santiago de Cali, 2017.
- [43] Dirección Territorial Andes Occidentales, "PLAN DE MANEJO 2017-2022 PARQUE NACIONAL NATURAL LOS NEVADOS", Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2017.
- [44] A. I. Mejía y Alfonso I. Mejía, "Identification and characterization of dendritic, parallel, pinnate, rectangular, and trellis networks based on deviations from planform self-similarity", *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 113. pp. 1-21. 2008.

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX_\lambda} - L_{MIN_\lambda}}{Q_{calmax\lambda} - Q_{calmin\lambda}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{MIN_\lambda} \quad (1)$$

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (2)$$

$$L_e = \left(\frac{(A+B)\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (3)$$

$$L_s(\rho, h) = L_{gnd}(\rho, h) + L_{atm}(h) \quad (4)$$

$$R_{CIBR} = \frac{L_m}{\omega_{r1} * L_{r1} + \omega_{r2} * L_{r2}}, \quad \text{Donde } \omega_{r1} = \frac{\lambda_{r2} - \lambda_m}{\lambda_{r2} - \lambda_{r1}} \quad y \quad \omega_{r2} = \frac{\lambda_m - \lambda_{r1}}{\lambda_{r2} - \lambda_{r1}} \quad (5)$$

$$R_{LIRR} = \frac{\overline{L_m}}{LIR([\lambda_r], [L_r])|_{\overline{\lambda_m}}} \quad (6)$$

$$R_{APDA} = \frac{\overline{L_m - L_{atm,m}}}{LIR([\lambda_r], [L_r - L_{atm,r}])|_{\overline{\lambda_m}}} \quad (7)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{2n} \\ X_{p1} & X_{p2} & X_{pn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Sigma x = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{2p} \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \sigma_{pp} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1^t X = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \cdots + a_{p1}X_p \\ Y_2 &= a_2^t X = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \cdots + a_{p2}X_p \\ Y_p &= a_p^t X = a_{1p}X_1 + a_{2p}X_2 + \cdots + a_{pp}X_p \end{aligned} \quad (10)$$

$$Var(Y_i) = a_i^t \Sigma x a_i \quad (11)$$

$$Cov(Y_i, Y_k) = a_1^t a_k^t \quad (12)$$

$$v(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (13)$$

$$TB = \frac{K_2}{\ln \left(1 + \frac{K_1}{B(T)} \right)} \quad (14)$$

$$LST = \frac{TB}{1 + W * \left(\frac{TB}{P}\right) * \ln(\varepsilon)} \quad (15)$$

$$P_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (16)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (17)$$

$$P = \text{Arc tan} \left(\sqrt{\left(\frac{dZ}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dY}\right)^2} \right) \quad (18)$$

$$\frac{dZ}{dX} = \frac{(Z_c + 2\Delta Z_f + Z_i) - (Z_a + 2\Delta Z_d + Z_g)}{8\Delta x} \quad (19)$$

$$\frac{dZ}{dY} = \frac{(Z_g + 2\Delta Z_h + Z_i) - (Z_a + 2\Delta Z_b + Z_g)}{8\Delta y} \quad (20)$$

$$Pendiente_{porcentaje} = 100 * \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (21)$$

$$Pendiente_{grados} = \text{Arc tan} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \quad (22)$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{dZ}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dY}\right)^2} * 100 \quad (23)$$

$$(Z - Z_1) * (Z - Z_2) < 0 \quad (24)$$

$$Z > Z_1 \text{ y } Z < Z_2 \quad (25)$$

$$Z < Z_1 \text{ y } Z > Z_2 \quad (26)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} r_i^2}} \right] \quad (27)$$